



DOI: 10.18721/JEST230415

УДК 621.791.357

В.Л. Федяев¹, П.П. Осипов², А.В. Беляев³, Л.В. Сироткина⁴

1, 2 — Институт механики и машиностроения
Казанского научного центра РАН, Казань, Россия

3 — Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

4 — Казанский государственный энергетический университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКЕ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ

Рассматривается точечная электроконтактная сварка деталей с покрытиями. Целями настоящей работы являются математическое описание тепловых процессов, протекающих при электроконтактной сварке деталей с покрытиями, установление особенностей их нагрева. Для описания протекающих при этом тепловых процессов предлагается математическая модель, позволяющая, при определенных допущениях учитывать наличие легкоплавких покрытий путем скачкообразного изменения термического, электрического сопротивлений, площади контакта свариваемых деталей, деталей и электродов. В ходе численных экспериментов при сварке трех деталей одинаковой толщины варьируется форма импульса тока, названные выше параметры, а также интенсивность стока тепла в радиальном направлении. Полученные результаты в целом согласуются с имеющимися представлениями, позволяют оценить динамику роста температуры в электродах и деталях, увеличения размеров сварочного ядра.

МОДЕЛИРОВАНИЕ; СВАРКА; ПРОЦЕССЫ; ДЕФЕКТЫ; ДЕТАЛИ; ПОКРЫТИЯ.

Ссылка при цитировании:

В.Л. Федяев, П.П. Осипов, А.В. Беляев, Л.В. Сироткина. Математическое моделирование процессов, протекающих при электроконтактной сварке деталей с покрытиями // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 149–158. DOI: 10.18721/JEST230415.

V.L. Fedyaev¹, P.P. Osipov², A.V. Beljaev³, L.V. Sirotkina⁴

1, 2 — Institute of mechanics and engineering,
Kazan science center RAS, Kazan, Russia

3 — Kazan national resersh technical university named
after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

4 — Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OCCURRING DURING ELECTRICAL CONTACT WELDING OF PARTS WITH COATINGS

Spot electrical contact welding of parts with coatings is considered. The aim of this work is a mathematical description of the thermal processes that occur during electrical contact welding of parts with coatings and determining the specifics of their heating. To describe the thermal processes occurring in these conditions, a mathematical model is proposed that allows, under certain assumptions, an assessment of the presence of low-melting coatings by a sudden change in the thermal and electric resistance, contact area of the welded parts, parts and electrodes. In the course of numerical experiments, when welding three parts of the same thickness, the above-mentioned parameters vary, as well as the heat flux in the radial direction. The obtained results, in general, are consistent with the available concepts and allow evaluating the dynamics of temperature growth in electrodes and parts, as well as an increase in the size of the welding core.

MODELING; WELDING; PROCESSES; DEFECTS; PARTS; COATINGS.

Citation:

V.L. Fedyaev, P.P. Osipov, A.V. Beljaev, L.V. Sirotkina, Mathematical modeling of processes occurring during electrocontact welding of parts with coatings, *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23(04)(2017) 149–158, DOI: 10.18721/JEST230415.

Введение

Точечная контактная, рельефная сварка деталей широко применяются в промышленности*. Используемые при этом оборудование и технологии подробно описаны в литературе. Не останавливаясь на общих вопросах, акцентируем внимание на случае сварки деталей с покрытиями.

Наличие покрытий, как известно, приводит к определенным трудностям в получении бездефектных соединений. В частности, может наблюдаться вырывание металла из сварочного соединения электродами из-за налипания на них материала покрытия. Кроме того, происходит выгорание, выплески металла из-под электродов и из литого ядра. В случае недостаточной подводимой мощности, наоборот, имеет место непровар, отсутствие литого ядра. Типичными дефектами являются также охрупчивание сварочной точки за счет перемешивания металла ядра и покрытия, несплошность зоны сварки и т.д.

С целью предотвращения появления дефектов предлагаются определенные меры. Например, силу тока рекомендуется увеличивать приблизительно на 30%, а время сварки — процентов на 20. Можно также повышать нагрузки на электроды, что позволяет вытеснять материал покрытия из зоны сварки, более часто править электроды или заменять их. Эти мероприятия, несомненно, полезны, но носят достаточно общий характер. Для того чтобы иметь возможность принять эффективные меры в каждом конкретном случае, следует располагать инструментом, позволяющим оперативно анализировать ситуацию. Сделать это

* Патент на изобретение RUS2558322. Способ контактной точечной сварки меди и медных сплавов // Люшинский А.В., Фёдорова Е.С., Желонкина О.Г., Ярочкина Г.Е. Приоритет 08.04.2014.

Патент на изобретение RUS2517640. Способ формирования металлопокрытия контактной приваркой присадочных проволок // Нафиков М.З., Загиров И.И., Ахметьянов И.Р., Зайнуллин А.А., Нуртдинов Д.М. Приоритет 26.02.2013.

можно с помощью математических моделей, используя аналитические либо численные методы решения соответствующих задач. Разработке их посвящена настоящая работа.

Цели настоящей работы — математическое описание тепловых процессов, протекающих при электроконтактной сварке деталей с покрытиями, и установление особенностей их нагрева.

Материал и методика работы. Типичная схема точечной контактной сварки двух деталей показана на рис. 1. Ограничимся количеством соединяемых деталей не более трех. Учитывая, что покрытия [1, 2] наносятся как на одну, так и на обе стороны, можно выделить, в принципе, более 40 вариантов сварки. Кроме того, следует иметь в виду, что могут быть разными толщины соединяемых деталей, покрытия, свойства материала основы и покрытия.

Создаваемые модели [3] должны учитывать эти обстоятельства и описывать следующие

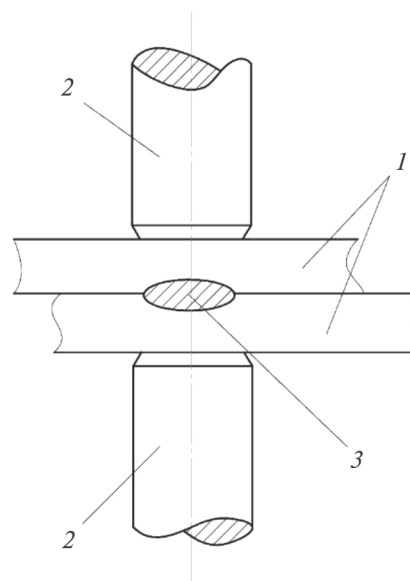


Рис. 1. Схема точечной контактной сварки двух деталей: 1 — свариваемые детали; 2 — электроды; 3 — сварочное ядро

Fig. 1. Scheme of spot welding of two parts: 1 — welded parts; 2 — electrodes; 3 — welding core

щие процессы, протекающие при контактной сварке: деформирование деталей и электродов; прохождение электрического тока; разогрев и последующее охлаждение системы. Причем основным здесь является тепловой процесс. Именно ему уделяется ниже наибольшее внимание.

При создании математических моделей тепловых процессов точечной сварки [4–7] за основу взята теория академика Н.Н. Рыкалина, а также использованы результаты работ [8–10]. Учитывается, что материал покрытия легкоплавкий (цинк, цинкومت и т.д.).

Расчетное исследование

Рассмотрим процессы, протекающие в системе, состоящей из электродов и вертикально расположенных плоских свариваемых деталей. Между элементами системы, а также между средой и левой границей, средой и правой границей учитываются контактные термические и электрические сопротивления. Считается также общепринятым, что элементы системы имеют различные начальные температуры. В дополнение к этому полагаем следующее:

- 1) температура в ядре зависит только от продольной координаты, поток тепла квазиодномерный;
- 2) потери тепла из ядра во вне не учитываются;
- 3) электрический ток распространяется в элементах системы по прямым линиям, которые могут либо расширяться, либо сужаться в зависимости от конфигурации элементов системы.

Согласно принятым допущениям в каждом из элементов (деталь, электрод) тепло распространяется по закону

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q. \quad (1)$$

Здесь: T — температура; τ — время; x — продольная координата, начало которой располагается в левом крайнем сечении системы; $a = \lambda/(c\rho)$ — коэффициент температуропроводности; ρ , λ , c — плотность, коэффициент теплопроводности, теплоемкость материала соответствующего элемента рассматриваемой системы; $Q = Q(\tau) = q(\tau)/(c\rho)$ — джоулево тепло; $q(\tau) = \bar{\sigma}(I/S)^2$ — удельная интенсивность джоулевого тепловыделения; I — ток; $S = S(x)$ —

площадь сечения; $\bar{\sigma}$ — удельное электрическое сопротивление материала элементов системы.

Основной недостаток этой модели состоит в том, что не учитывается отток тепла в радиальном, перпендикулярном к оси x направлении. Поскольку температура на границе ядра с включением импульса тока резко возрастает, то для оценки оттока тепла из ядра рассмотрим теплоперенос [11] в полубесконечном пространстве при линейно-возрастающей температуре на границе. Таким образом, приходим к следующей задаче:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad T(0, \bar{x}) = T_0, \quad T(\tau, 0) = T_0 + A\tau, \quad (2)$$

где \bar{x} — координата, нормальная к оси x ; T_0 — начальная температура; A — характерная величина скорости роста температуры на границе ядра.

Применяя к (2) преобразование Лапласа–Карсона

$$T^*(s, \bar{x}) = s \int_0^{\infty} T(\tau, \bar{x}) \exp(-\tau s) d\tau,$$

получим следующую задачу:

$$T^* s - T_0 s = a \frac{\partial^2 T^*}{\partial \bar{x}^2};$$

$$T^*(s, 0) = T_0 + \frac{A}{s}. \quad (3)$$

Решение её имеет вид

$$T^*(s, 0) = T_0 + \frac{A}{s} \exp\left(\sqrt{\frac{s-a}{a}} \bar{x}\right).$$

При этом мощность потока тепла в нормальном к x направлению вычисляется следующим образом:

$$P^*(s) = -\lambda \frac{\partial T^*}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = -\lambda A / \sqrt{as}.$$

Соответственно,

$$p = p(\tau) = -\frac{2\lambda A}{\sqrt{a\pi}} \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что величина A зависит от процесса нагрева ядра [12]. В свою очередь, он в значительной степени ослабляется потерями тепла на фазовые переходы, оттоком его из ядра; это определяется значениями параметра A . Учитывая сказанное, вместо упрощенного уравнения (1) запишем

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q + \frac{2p}{rcp}. \quad (5)$$

Следующий важный вопрос — моделирование тепловых процессов на стыке двух тел. Исходя из физических представлений, приведенных в научно-технической литературе [3], примем следующие допущения:

1. Два тела (рис. 2) контактируют на ограниченных площадках $S(j_g, j)$ (j_g — номер границы, слева направо $j_g = (1, 2, \dots)$); $S(j_g, 1)$ — площадь контакта до того, как расплавится металл с первой (левой) и второй (правой) стороны контакта; $S(j_g, 2)$ — площадь после того, как металл расплавится хотя бы с одной стороны контакта.

2. Между пластинами существует термическое контактное сопротивление, которое приводит к тому, что в сечении S температуры слева (T_1) и справа (T_2) не совпадают, а мощность потока тепла Q_k через стык выражается формулой

$$Q_k = (T_1 - T_2)S(j_g, j) / R_k(T_1, T_2), \quad (6)$$

где величина $R_k(T_1, T_2)$ — удельное термическое контактное сопротивление, сильно зависящее от давления сжатия деталей.

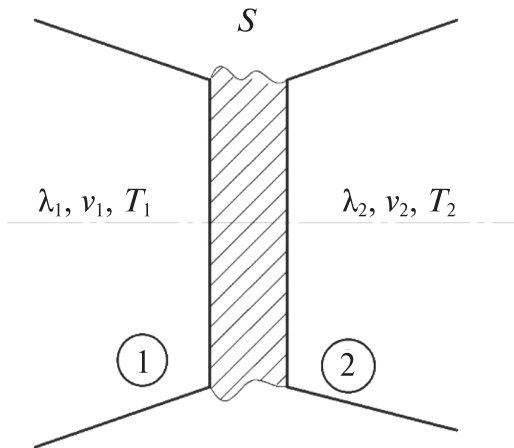


Рис. 2. Схема контакта двух тел: S — область контакта; $\lambda_1, \lambda_2, \nu_1, \nu_2$ — коэффициенты теплопроводности, потенциалы на границах S ; T_1, T_2 — температура материала на этих границах

Fig. 2. The scheme of contact of two bodies: S — area of contact; $\lambda_1, \lambda_2, \nu_1, \nu_2$ — the coefficients of thermal conductivity, potentials at the boundaries S ; T_1, T_2 — material temperature at these boundaries

3. Между телами существует электрическое контактное сопротивление. Это приводит к тому, что проходящий через контакт ток создает на нем разность потенциалов, и появляется дополнительное джоулево тепловыделение. При условии, что потенциалы ν_1, ν_2 на поверхностях стыка с изменением радиуса r не меняются, имеем

$$\frac{I}{S(j_g, j)} = \frac{\nu_1 - \nu_2}{R_E(T_1, T_2)}, \quad (7)$$

где $R_E(T_1, T_2)$ — удельное электрическое сопротивление, которое также зависит от давления сжатия.

Удельная мощность джоулевых тепловыделений на контакте равна

$$P_E = I(\nu_1 - \nu_2) = \frac{I^2}{S(j_g, j)} R_E(T_1, T_2). \quad (8)$$

4. Теплоемкостью межстыкового пространства пренебрежем ввиду ее малости. В результате тепло, выделяющееся на контакте, не задерживается, а «рассасывается» вбок, т.е.

$$S(j_g, j) \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = P_E. \quad (9)$$

Наличие разности температур на стенках приводит к тому, что потоки тепла в левое тело отличаются от потоков в правое на величину $2Q_k$. Это означает перераспределение потоков тепла: отнятая от одного тела величина Q_k передается другому телу системы. Соответственно,

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = -2 \frac{T_1 - T_2}{R_k(T_1, T_2)}. \quad (10)$$

Из уравнений (9), (10) следует

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0,5 \bar{P}_E - P_k, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = -0,5 \bar{P}_E - P_k, \quad (11)$$

где $P_k = P_k(T_1, T_2) = (T_1 - T_2) / R_k(T_1, T_2)$; $\bar{P}_E = P_E / S(j_g, j)$.

Эти два соотношения при условии, что величины $I, S(j_g, j)$ и зависимости $R_E = R_E(T_1, T_2)$ известны, замыкают задачу (5).

Обсуждение результатов

Для расчета характеристик тепловых процессов, описываемых представленными выше математическими моделями, используются метод конечных разностей и явная схема.

При проведении вычислительных экспериментов рассматривался наиболее типичный вариант электроконтактной сварки трех одинаковых плоских стальных деталей толщиной $h = 8 \cdot 10^{-4}$ м (рис. 3) со следующими средними теплофизическими характеристиками [13]: $\lambda = 47$ Вт/(м · град); $c = 480$ Дж/(кг · град); $\rho = 7700$ кг/м³; $a = 0,127 \cdot 10^{-4}$ м²/сек. Начальная температура T_0 предполагается также одинаковой, равной 20 °С.

Электроды считаются бронзовыми (марка БРХЦР), водоохлаждаемыми. Расстояние от конца электродов до охлаждающей жидкости составляет $5 \cdot 10^{-3}$ м. В начальный момент времени они обладают температурой 100 °С; температура охлаждающей жидкости поддерживается на уровне 10 °С. Согласно имеющимся в литературе данным по значениям $\lambda_E, c_E, \rho_E, a_E$ для материала электродов выбраны значения $\lambda_E = 55$ Вт/(м · град); $c_E = 385$ Дж/(кг · град); $\rho = 8500$ кг/м³; $a = 0,168 \cdot 10^{-4}$ м²/сек; $r_e = 0,0025$ м.

Удельное электрическое сопротивление стали — $\sigma = 1,3 \cdot 10^{-5}$ ом · м, бронзы — $\sigma_e = 1,2 \times 10^{-4}$ ом · м.

Наличие покрытий учитывается в данных расчетах косвенно, скачкообразным изменением термического, электрического сопротивлений, а также площадей контакта.

В ходе экспериментов варьировалась, во-первых, форма импульса тока и его максимальное значение. Время импульса оставалось постоянным, равным 0,15 сек. Во-вторых, менялась величина контактных термического и электрического сопротивлений, площади контакта, в том числе скачкообразно. Кроме того, расчеты проводились как со стоком тепла в радиальном направлении в свариваемых деталях, так и без него.

Когда в электродах и деталях в течение 0,15 сек ток остается постоянным ($I = 7$ кА), сток тепла в радиальном направлении отсутствует, а между свариваемыми деталями имеет место так называемый «сухой» контакт ($R_k = 0$; $S = 0,2 \cdot 10^{-4}$ м²); $R_{E3} = R_{E4} \cong 1,0 \cdot 10^{-9}$ ом · м²; $R_{E1} = R_{E2} = R_{E5} = R_{E6} = 0$. Расчет температуры в электродах и деталях для разных моментов времени в этом случае иллюстрирует рис. 4, а. Видно, что вблизи поверхностей контакта свариваемых деталей температура значительно увеличивается, что характерно для подобных процессов. В целом же рост температуры аномально большой, по всей видимости, из-за не-

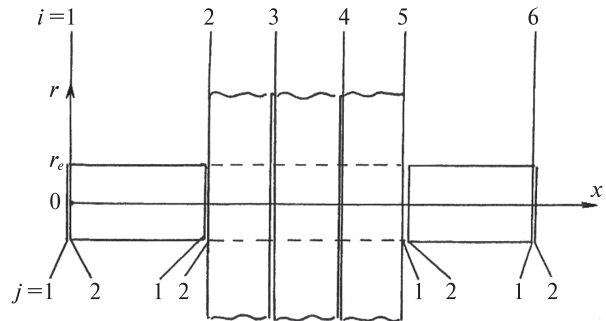


Рис. 3. Расчетная схема сварки трех деталей: i — номер поверхности контакта; j — номер стороны поверхности контакта; x — продольная координата; r — поперечная (радиальная) координата; r_e — радиус электродов

Fig. 3. The design scheme of welding of three parts: i — contact surface number; j — the number of the side of the contact surface; x — longitudinal coordinate; r — transverse (radial) coordinate; r_e — the radius of the electrodes

учета стока тепла в радиальном направлении. При $R_{E3} = 0,5 \cdot 10^{-9}$ ом · м², температура в общем уменьшается, появляется асимметрия тепловой картины (рис. 4, б).

Дальнейшее уменьшение R_{E3}, R_{E4} до $0,25 \times 10^{-9}$ ом · м² дает тепловые поля, показанные на рис. 5, а. Наконец, если учитывать электрическое сопротивление между деталями и электродами, то, полагая $R_{E2} = R_{E5} = 0,25 \cdot 10^{-9}$ ом · м², получим достаточно реалистическую картину (рис. 5, б).

Воспользовавшись приведенными здесь данными, можно определить время зарождения сварочного ядра, проследить динамику его роста.

В рассмотренных примерах удельное термическое контактное сопротивление принято нулевым. Если же $R_{k1} = R_{k3} = R_{k4} = R_{k6} = 0$, а между электродами и деталями $R_{k2} = R_{k5} = 3,0 \cdot 10^{-5}$ м² · град/Вт, то детали оказываются как бы в тепловой изоляции, что видно на рис. 6.

Далее предполагается, что импульс тока имеет трапецеидальную форму (рис. 7). Влияние формы импульса на динамику изменения температуры в деталях и электродах можно проследить, сравнивая рис. 5, б и 8, а. Видно, что в случае трапецеидального импульса, в отличие от прямоугольного, вначале происходит медленный рост температур, затем достаточно быстрый разогрев, который потом замедляется вплоть до того, что начинается охлаждение деталей.

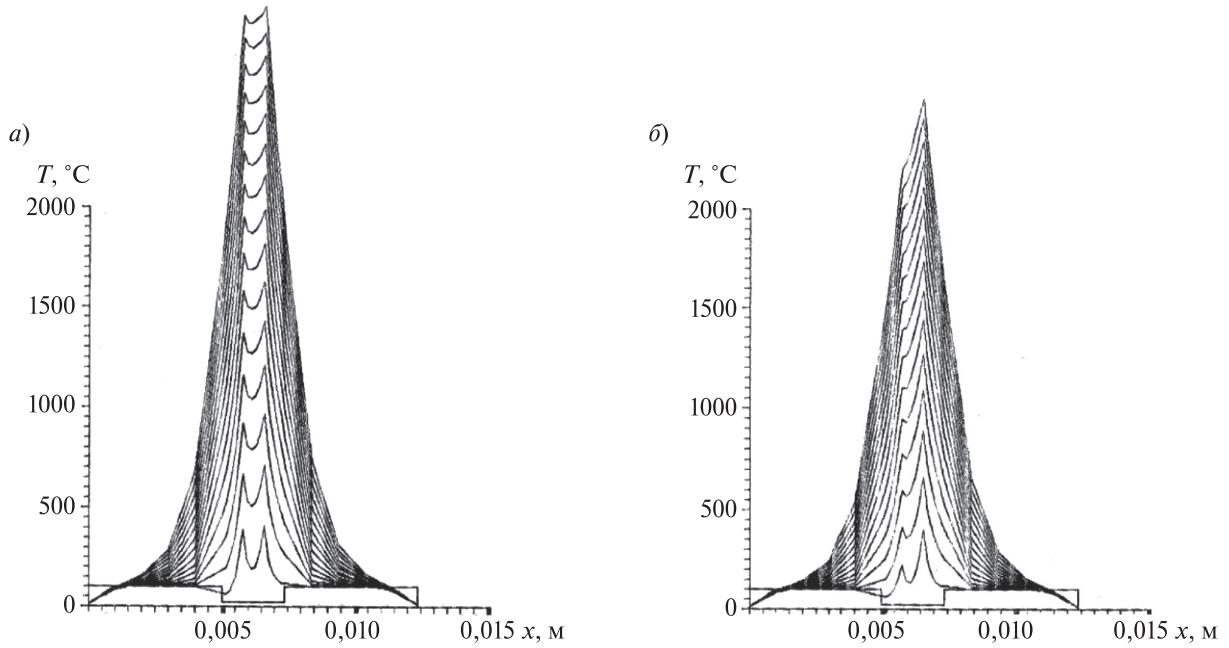


Рис. 4. Динамика изменения температуры в электродах и соединяемых деталях в отсутствие стока тепла в поперечном направлении при $I = 7$ кА:

a — мощность джоулевых тепловыделений на участках контакта свариваемых деталей при $R_{E3} = R_{E4} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ ом \cdot м²; b — при $R_{E3} = 0,5 \cdot 10^{-9}$ ом \cdot м², $R_{E4} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ ом \cdot м²

Fig. 4. Dynamics of temperature change in electrodes and connected parts in the absence of heat sink in the transverse direction at $I = 7$ кА:

a — the power of Joule heat release at the contact areas of welded parts at $R_{E3} = R_{E4} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ $\Omega \cdot$ м²; b — at $R_{E3} = 0,5 \cdot 10^{-9}$ $\Omega \cdot$ м², $R_{E4} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ $\Omega \cdot$ м²

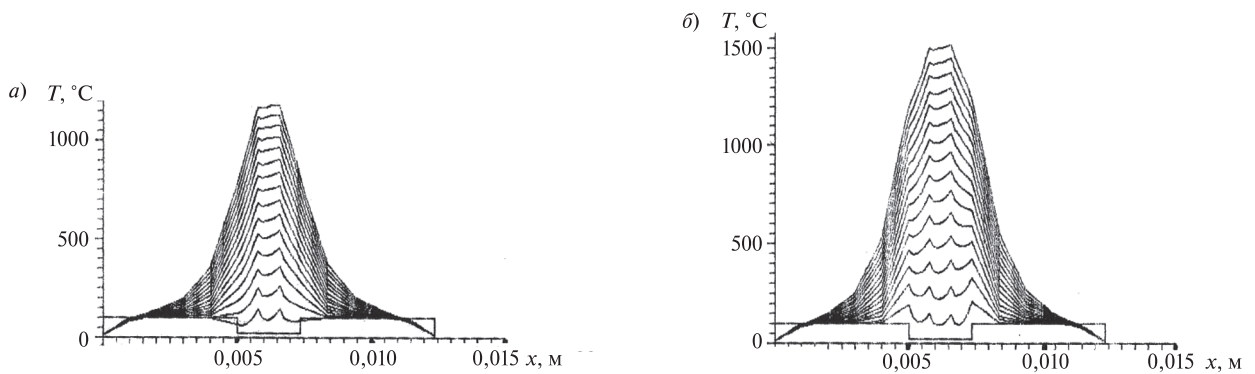


Рис. 5. Динамика изменения температуры в электродах и соединяемых деталях при a — $R_{E3} = R_{E4} = 0,25 \cdot 10^{-9}$ ом \cdot м²; b — $R_{E2} = R_{E3} = R_{E4} = R_{E5} = 0,25 \cdot 10^{-9}$ ом \cdot м²

Fig. 5. Dynamics of temperature changes in electrodes and connected parts at a — $R_{E3} = R_{E4} = 0,25 \cdot 10^{-9}$ $\Omega \cdot$ м²; b — $R_{E2} = R_{E3} = R_{E4} = R_{E5} = 0,25 \cdot 10^{-9}$ $\Omega \cdot$ м²

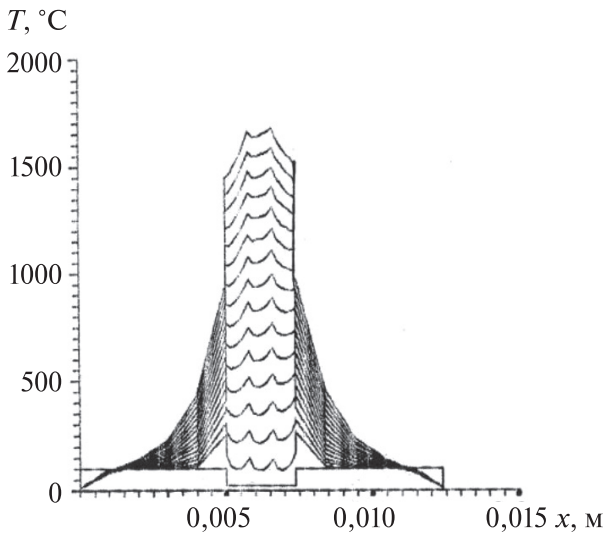


Рис. 6. Динамика изменения температуры в электродах и соединяемых деталях с учетом удельных термических контактных сопротивлений при $R_{k2} = R_{k3} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$
 Fig. 6. Dynamics of temperature change in electrodes and connected parts taking into account specific thermal contact resistances at $R_{k2} = R_{k3} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{deg} / \text{W}$

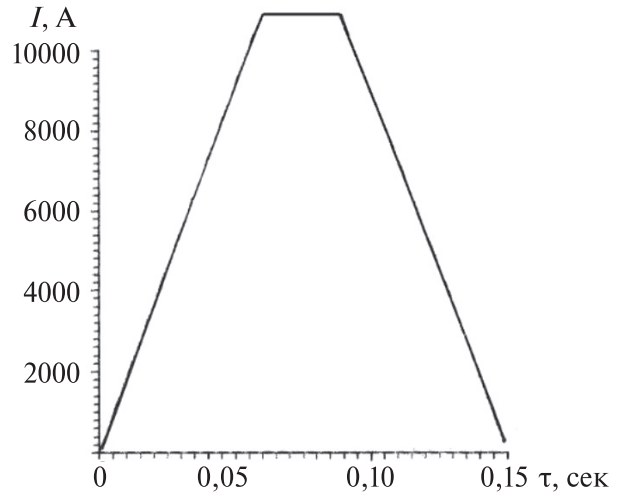


Рис. 7. Трапециoidalное изменение импульса тока с течением времени ($I_{\text{max}} = 12 \text{ кА}$)
 Fig. 7. Trapezoidal variation of the current pulse with time ($I_{\text{max}} = 12 \text{ кА}$)

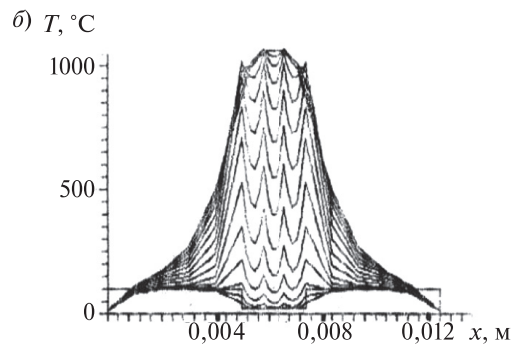
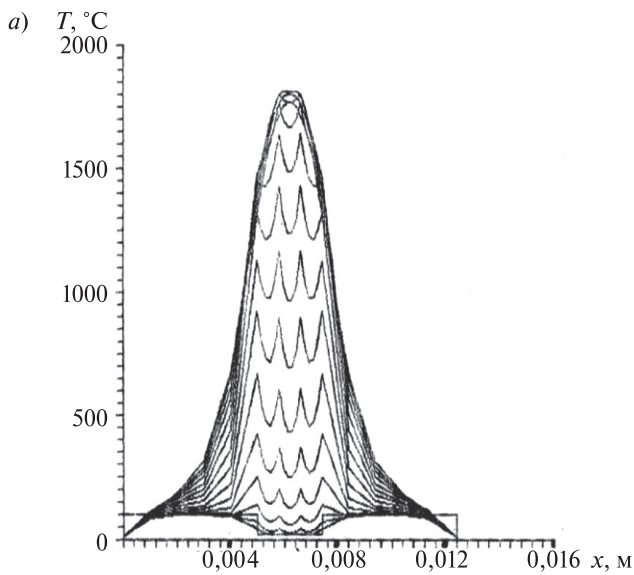


Рис. 8. Динамика изменения температуры в электродах и свариваемых деталях:
 а — при трапециoidalном импульсе тока $R_{E2} = R_{E3} = R_{E4} = R_{E5} = 0,25 \cdot 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$;
 б — с учетом стока тепла в радиальном направлении

Fig. 8. Dynamics of temperature change in electrodes and welded parts:
 а — with trapezoidal current pulse $R_{E2} = R_{E3} = R_{E4} = R_{E5} = 0,25 \cdot 10^{-9} \text{ } \Omega \cdot \text{m}^2$;
 б — taking into account the heat flow in the radial direction

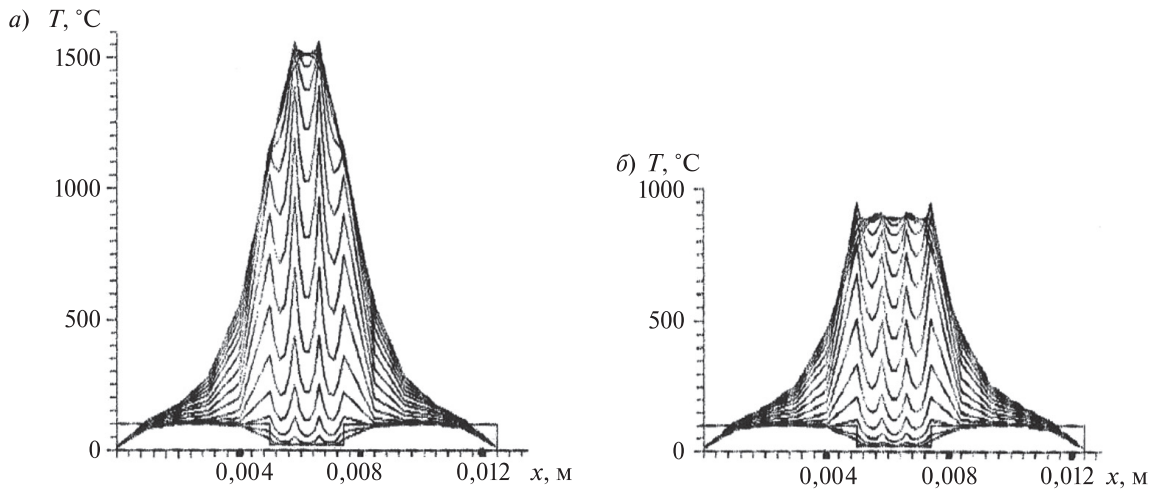


Рис. 9. Динамика изменения температуры в электродах и свариваемых деталях при трапециoidalном импульсе тока и учете стока тепла в радиальном направлении ($R_{E3} = R_{E4} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$):
 а — площадь контакта $S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; б — $S_2 = S_3 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $S_3 = S_4 = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
 Fig. 9. The dynamics of temperature change in electrodes and welded parts with a trapezoidal current pulse and taking into account the heat flow in the radial direction ($R_{E3} = R_{E4} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ } \Omega \cdot \text{м}^2$):
 а — contact area $S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; б — $S_2 = S_3 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $S_3 = S_4 = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Как уже отмечено выше, учет стока тепла в радиальном направлении может существенно понизить температуру в деталях. Эксперименты подтверждают это (см. рис. 8, а и 8, б). Увеличение же вдвое электрических контактных сопротивлений между деталями ($R_{E3} = R_{E4} = 0,5 \times 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$) приводит к вполне приемлемым результатам (рис. 9, а).

Что касается влияния площади контакта, то очевидно: уменьшение ее будет способствовать

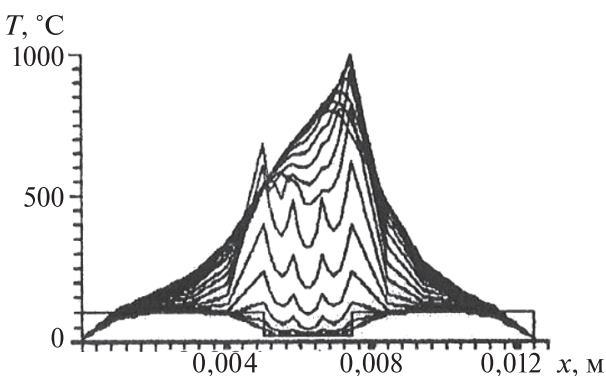


Рис. 10. Динамика изменения температуры в электродах и свариваемых деталях при учете расплавления материала покрытия
 Fig. 10. The dynamics of temperature changes in electrodes and welded parts, taking into account the melting of the coating material

повышению температуры, а увеличение, наоборот, снижению. Действительно, увеличивая площадь контакта между деталями с $0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ до $0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ($S_2 = S_5 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $S_3 = S_4 = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) мы наблюдаем довольно сильное падение температуры (рис. 9, б).

Согласно предлагаемому подходу имитация покрытий на поверхности деталей производится за счет скачкообразных изменений термического и электрического сопротивлений, а также площадей контакта при достижении определенной температуры. Учитывая, что температура плавления цинка около $500 \text{ }^\circ\text{C}$, за критическую температуру примем это значение. В расчетах полагаем, что при температурах ниже $500 \text{ }^\circ\text{C}$ $R_{E2} = R_{E5} = 0,25 \cdot 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$; $R_{E3} = R_{E4} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$; $R_{k2} = R_{k3} = R_{k4} = R_{k5} = 1,0 \times 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$; $S_2 = S_5 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $S_3 = S_4 = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. При более высоких температурах $R_{E2} = R_{E3} = R_{E4} = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$; $R_{E5} = 0,25 \times 10^{-9} \text{ ом} \cdot \text{м}^2$; $R_{k2} = R_{k3} = R_{k4} = R_{k5} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \times \text{град/Вт}$; $S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Следует заметить, что возрастание сопротивлений и площадей контакта при расплавлении металла подтверждается литературными данными [3]. Полученные при указанных значениях параметров результаты приведены на рис. 10.

По сравнению со случаем неизменных характеристик (рис. 9, а) максимальная темпера-

тура здесь упала почти на 30%. Приблизительно на столько же рекомендуется увеличивать величину тока при сварке покрытых деталей.

Заключение

Получение бездефектных соединений покрытых деталей с помощью электроконтактной точечной сварки — важная техническая задача. Один из способов ее решения — отыскание рациональных технологических режимов. При этом в ходе отработки технологий сварки полезно применять методы математического моделирования.

Представленные в работе математические модели тепловых процессов, протекающих при точечной сварке, позволяют учитывать разное число соединяемых деталей, наличие покры-

тий, другие факторы. Они дают возможность оценить динамику роста температуры в деталях и электродах, размеры сварочного ядра.

В качестве примера подробно рассмотрен случай сварки трех деталей равной толщины. Результаты вычислительных экспериментов приведены на графиках, которые дают наглядное представление о ходе процесса сварки, его особенностях, влиянии покрытий. В частности, показано, что вблизи поверхностей контакта свариваемых деталей температура значительно увеличивается. Однако при учете стока тепла в радиальном направлении она оказывается заметно меньше. Установлено также, что покрытия на поверхности деталей приводят к уменьшению максимальных температур в свариваемых деталях почти на 30%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахно Л.И., Сахно О.И., Варламов Ю.В., Лихачев Д.И. Аналитический расчет импеданса трансформатора машины контактной сварки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2016. № 1 (238). С. 57–64. DOI: 10.5682/JEST.238.6.
2. Комлев Д.И., Калита В.И., Радюк А.А., Меньшиков Г.А., Власенко А.Н., Иванников А.Ю. Воздействие контактной шовной сварки на плазменные покрытия // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 4. С. 69–77.
3. Хоменко В.И., Сударкин А.Я., Семенов И.Л. Компьютерная паспортизация качества соединений, выполненных стыковой контактной сваркой оплавлением // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1 (63). С. 28–31.
4. Борисенко Е.А., Шахматова В.А., Беляков Н.Н., Козловский С.Н. Расчетное определение температуры при точечной контактной сварке // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1. № 10. С. 93–94.
5. Анциборов А.Н., Комиринко А.В. Физическое моделирование контактной сварки // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2014. № 2. С. 88–91.
6. Ерофеев В.А., Пьянков И.Б. Физико-математическая модель процесса стыковой контактной сварки оплавлением // Вопросы материаловедения. 2016. № 3. С. 115–125.
7. Ерофеев В.А., Пьянков И.Б., Арсеньева А.А. Численное моделирование контактной рельефной сварки крестообразных соединений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 1. С. 109–117.
8. Rice W., Funk E.I. Analytical investigation of the temperature distributions during resistance welding // Welding J., 1967. № 4. P. 175–186.
9. Nicol H.A. The finite element modeling of the resistance spot welding process // Welding J. 1984. Vol. 63. Pt. 4. P. 123–132.
10. Прохоров А.В. Тепловая модель контактной точечной сварки // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 21–24.
11. Скиданенко А.В. Моделирование процессов теплопередачи при точечной контактной сварке // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 6. С. 813.
12. Козлов И.К., Трофимов А.С. Исследование и оптимизация процесса нагрева при контактной стыковой сварке сопротивлением // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2016. № 2 (113). С. 107–114.
13. Храмовский Ю.В., Лепешев В.Ю., Добрынина А.В. Теплофизические характеристики контактной точечной сварки легких сплавов // Сварочное производство, 2013. № 5. С. 39–41.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДЯЕВ Владимир Леонидович — доктор технических наук главный научный сотрудник Института механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук.
E-mail: morenko@imm.knc.ru

ОСИПОВ Петр Петрович — доктор физико-математических наук ведущий научный сотрудник Института механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук.

E-mail: petro300@rambler.ru

БЕЛЯЕВ Алексей Витальевич — кандидат технических наук доцент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ.

E-mail: alexey-beljaev@mail.ru

СИРОТКИНА Лилия Витальевна — кандидат химических наук доцент Казанского государственного энергетического университета.

E-mail: liliya_belyaeva@mail.ru

REFERENCES

- [1] **Sakhno L.I., Sakhno O.I., Varlamov Yu.V., Likhachev D.I.** Analiticheskiy raschet impedansa transformatora mashiny kontaktной svarki. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2016. № 1(238). S. 57–64. DOI: DOI: 10.5682/JEST.238.6. (rus.)
- [2] **Komlev D.I., Kalita V.I., Radyuk A.A., Menshikov G.A., Vlasenko A.N., Ivannikov A. Yu.** Vozdeystviye kontaktной shovnoy svarki na plazmennyye pokrytiya. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2013. № 4. S. 69–77. (rus.)
- [3] **Khomenko V.I., Sudarkin A. Ya., Semenov I.L.** Kompyuternaya pasportizatsiya kachestva soyedineniy, vypolnennykh stykovoy kontaktной svarkoy oplavleniyem. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2014. № 1(63). S. 28–31. (rus.)
- [4] **Borisenko Ye.A., Shakhmatova V.A., Belyakov N.N., Kozlovskiy S.N.** Raschetnoye opredeleniye temperatury pri tochechnoy kontaktной svарке. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2014. T. 1. № 10. S. 93–94. (rus.)
- [5] **Antsiborov A.N., Komirenko A.V.** Fizicheskoye modelirovaniye kontaktной svarki. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye v mashinostroyenii*. 2014. № 2. S. 88–91. (rus.)
- [6] **Yerofeyev V.A., Pyankov I.B.** Fiziko-matematicheskaya model protsessа stykovoy kontaktной svarki oplavleniyem. *Voprosy materialovedeniya*. 2016. № 3. S. 115–125. (rus.)
- [7] **Yerofeyev V.A., Pyankov I.B., Arsenyeva A.A.** Chislennoye modelirovaniye kontaktной relyefnoy svarki krestooobraznykh soyedineniy. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2017. № 1. S. 109–117. (rus.)
- [8] **Rice W., Funk E.I.** Analytical investigation of the temperature distributions during resistance welding. *Welding J*. 1967. № 4. P. 175–186.
- [9] **Nicol H.A.** The finite element modeling of the resistance spot welding process. *Welding J*. 1984. Vol. 63. Pt. 4. P. 123–132.
- [10] **Prokhorov A.V.** Teplovaya model kontaktной tochechnoy svarki. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2016. № 3. S. 21–24. (rus.)
- [11] **Skidanenko A.V.** Modelirovaniye protsessov teploperedachi pri tochechnoy kontaktной svарке. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2016. T. 80. № 6. S. 813. (rus.)
- [12] **Kozlov I.K., Trofimov A.S.** Issledovaniye i optimizatsiya protsessа nagreva pri kontaktной stykovoy svарке soprotivleniyem. *Trudy NGTU im. R. Ye. Alekseyeva*. 2016. № 2(113). S. 107–114. (rus.)
- [13] **Khramovskiy Yu.V., Lepeshev V. Yu., Dobryni-na A.V.** Teplofizicheskkiye kharakteristiki kontaktной tochechnoy svarki legkikh splavov. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2013. № 5. S. 39–41. (rus.)

AUTHORS

FEDYAEV Vladimir L. — Institute of mechanics and engineering, Kazan science center of Russian academy of sciences.

E-mail: morenko@imm.knc.ru

OSIPOV Petr P. — Institute of mechanics and engineering, Kazan science center of Russian academy of sciences.

E-mail: petro300@rambler.ru

BELJAEV Aleksey V. — Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev-KAI.

E-mail: alexey-beljaev@mail.ru

SIROTKINA Liliya V. — Kazan state power engineering university.

E-mail: liliya_belyaeva@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 27 сентября 2017 г.