

## Математическое моделирование процесса формирования литого ядра при точечной контактной сварке

КРИКЕНТ И.В.

Днепродзержинский государственный технический университет

Предложена комплексная математическая модель процесса формирования литого ядра при точечной контактной сварке. Модель учитывает взаимодействие электрических, тепловых и гидродинамических явлений в свариваемом металле. Приведены результаты расчёта физических полей при сварке деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм.

Ключевые слова: точечная контактная сварка, математическое моделирование, литое ядро, контактное сопротивление, температурное поле, конвективный теплоперенос

Запропонована комплексна математична модель процесу формування литого ядра при точковій контактній зварці. Модель враховує взаємодію електричних, теплових і гідродинамічних явищ в зварюваному металі. Приведені результати розрахунку фізичних полів при зварці деталей з низковуглецевої сталі завтовшки 2 мм.

Ключові слова: точкова контактна зварка, математичне моделювання, лите ядро, контактний опір, температурне поле, конвективний теплоперенос

The complex mathematical model of process of formation of a cast core is offered at resistance-spot welding. The model considers interaction electric, thermal and hydrodynamic processes in welding metal. Results of calculation of physical fields are given in the case of welding low-carbon steel details by thickness 2 mm.

Key words: spot welding, mathematic modeling, molten core, contact resistance, temperature field, convective heat transfer

**Введение.** Точечная контактная сварка (ТКС) широко применяется в современной промышленности при изготовлении различных металлоизделий. Процесс точечной контактной сварки характеризуется высокой производительностью, сравнительной простотой применяемого оборудования и хорошей гигиеничностью. Формирование соединения происходит в течение короткого времени под воздействием внешнего давления со стороны электродов и нагрева металла проходящим током.

В реальных условиях процесса ТКС затруднено экспериментальное определение таких важных, с точки зрения прогнозирования качества соединения, параметров как скорость охлаждения металла, длительность его пребывания выше некоторой характерной температуры и т. д. Дополнительным фактором, затрудняющим измерения, является относительно малый размер литого ядра. Прежде всего, это касается сварки небольших (менее 3 мм) толщин, которые наиболее часто соединяют с помощью ТКС.

Ввиду отмеченных особенностей точечной контактной сварки весьма перспективным методом исследования данного процесса представляется математическое моделирование. Для построения математических моделей физических процессов, которые определяют качество изделия при ТКС, использовались различные подходы.

Применение аналитических математических моделей для расчёта температурных полей в изделиях, свариваемых точечной и шовной контактной сваркой [1], позволяет адекватно вычислять температуру только на значительном удалении от зоны формирования соединения, что существенно ограничивает практическую ценность такого подхода. Модели, основанные на тепловом балансе зоны формирования литого ядра, использующие усреднённые по времени значения тепловых потоков в окружающий металл и электрических сопротивлений различных участков цепи [2,3,4], позво-

ляют рассчитывать режимы точечной контактной сварки, но не дают информации об электрических, температурных и других физических полях в свариваемом металле.

Применение численных методов существенно расширяет возможности математического моделирования технологических процессов, однако существующие в настоящее время численные модели процесса ТКС [5-9] не учитывают сложное взаимное влияние всего комплекса физических полей в зоне образования соединения и электрические параметры источника сварочного тока. Так, в частности, не учитывается конвективный перенос тепловой энергии в жидкой фазе. Кроме этого, в упомянутых выше моделях сила сварочного тока задаётся как исходный параметр, хотя в реальном процессе ТКС при фиксированном электрическом угле отпирания тиристорных ток изменяется вследствие изменения сопротивления свариваемых деталей и переходных контактов.

**Постановка задачи математического моделирования процесса формирования литого ядра при точечной контактной сварке.**

Реальный процесс формирования литого ядра обусловлен сложным распределением джоулевых источников теплоты, которое определяется электрическим полем в свариваемых деталях.

Электрическое поле порождает также и электромагнитные силы, приводящие в движение расплавленный металл. Теплопередача, которая наряду с тепловыделением формирует поле температур в металле, осуществляется как кондуктивным, так и конвективным путём за счёт циркуляции жидкой фазы. Теплопроводность металла, его удельное электрическое сопротивление и другие физические свойства существенно зависят от температуры. Динамика изменения электрического сопротивления в контакте «деталь-деталь» также обусловлена температурой последнего. Сила сварочного тока, которая определяет интенсивность теплового и

силового воздействия на металл, зависит от напряжения холостого хода, сопротивления свариваемых деталей и внутреннего сопротивления машины для контактной сварки.

Из сказанного можно сделать вывод, что адекватная математическая модель процесса формирования литого ядра при точечной контактной сварке должна включать в себя описание электрических, тепловых и гидродинамических процессов в свариваемом металле с учётом их сложного взаимодействия. Сила сварочного тока должна определяться расчётным путём с учётом электрического сопротивления зоны сварки, а свойства металла в каждой точке расчётной области необходимо задавать в соответствии с текущим распределением температурного поля в детали. Необходимо также учитывать динамику изменения контактного сопротивления между свариваемыми деталями в процессе сварки.

**Основные уравнения, описывающие процесс формирования сварного соединения при точечной контактной сварке.**

Математическая модель физических полей в зоне образования сварной точки с учётом гидродинамических явлений в жидкой фазе может быть записана в следующем виде.

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) = 0, \quad (1)$$

$$\vec{j} = -\sigma \operatorname{grad} \varphi, \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}, \quad (3)$$

$$\vec{f}_\sigma = \vec{j} \times \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (4)$$

$$\psi = \sigma (\operatorname{grad} \varphi)^2, \quad (5)$$

$$\tilde{c} \rho \frac{dT}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \psi, \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{d\vec{W}}{dt} &= -\operatorname{grad} P + \vec{f}_\sigma + \vec{f}_e, \\ \operatorname{div} \vec{W} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \vec{W} = 0. \quad (8)$$

Здесь:  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость металла;  $\varphi$  – электрический потенциал;  $\vec{H}$  – напряжённость магнитного поля;  $\vec{j}$  – плотность тока;  $\vec{f}_\sigma$  – объёмная плотность электромагнитной силы;  $\mu_0$  – универсальная магнитная постоянная;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\psi$  – объёмная плотность джоулевых источников теплоты;  $\tilde{c}$  – обобщённая теплоёмкость ( $\tilde{c} = c + \chi \frac{\partial \eta}{\partial T}$ , где  $c$  – истинная удельная теплоёмкость металла,  $\chi$  – удельная теплота фазового перехода,  $\eta$  – доля жидкой фазы);  $\rho$  – плотность среды;  $\lambda$  – удельная теплопроводность;  $\vec{W}$  – скорость движения металла;  $P$  – давление;  $\vec{f}_e$  – объёмная плотность сил вязкого трения, которая рассчитывается согласно [10].

Уравнения (7)-(8), описывающие динамику жидкой фазы, имеют смысл только в той части области, температура которой превышает температуру ликвидуса.

Поскольку сварная точка осесимметрична, будем рассчитывать физические поля в цилиндрической системе координат. Если толщина свариваемых деталей одинакова и равна  $\delta$  (рис. 1), то можно решать задачу

(1)-(8) в области  $r \in [0, L]$ ,  $z \in [0, \delta]$ . Здесь  $L$  – некоторая достаточно удалённая точка (величина  $L$  должна существенно превышать радиус формирующегося литого ядра).

Дополним систему (1)-(8) граничными условиями для искомых функций. Прежде всего, определим граничные условия для электрического потенциала  $\varphi$ . Если в плоскости симметрии между деталями положить потенциал равным нулю, то значение  $\varphi$  на нижней поверхности металла детали 1 (рис. 1) будет равно некоторому контактному падению напряжения

$$\varphi(z=0) = -R_1 j_z(z=0), \quad (9)$$

где  $j_z$  – аксиальная составляющая плотности тока,  $R_1$  – половина контактного сопротивления между деталями 1 и 2, отнесенного к единице поверхности ( $R_1$  находится вне области расчёта потенциала). Очевидно, что за пределами зоны контакта  $j_z = 0$ . С учётом (2) условие (9) можно переписать в виде

$$\varphi(z=0) = -R_1 \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}(z=0). \quad (10)$$

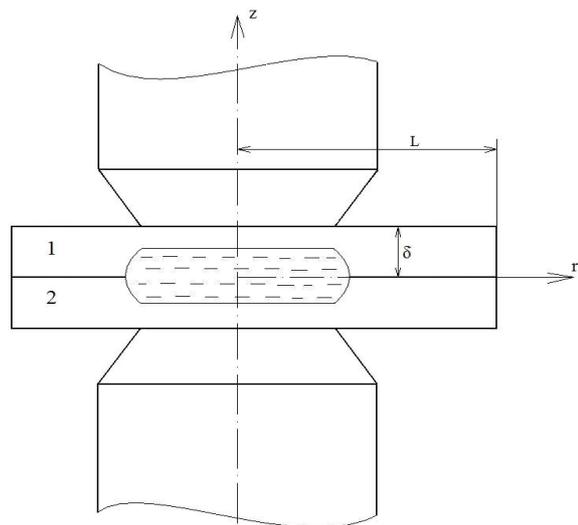


Рис. 1. Схема расчётной области

Величину  $R_1$ , по аналогии с [6], определим следующим образом

$$R_1 = \frac{R_k}{2} S_k \gamma(T), \quad (11)$$

где  $R_k$  – контактное сопротивление деталь-деталь в холодном состоянии;  $S_k$  – площадь контакта;  $\gamma(T)$  – функция, определяющая зависимость контактного сопротивления от температуры [2]. Численное значение  $R_k$  для подготовленных под сварку стальных поверхностей можно приближенно определить по эмпирической формуле [2]

$$R_k = \frac{0,005}{F^\alpha},$$

где  $F$  – усилие сжатия деталей,  $\alpha$  – показатель степени (для стали  $\alpha = 0,7$ ).

Поскольку сопротивление в контакте электрод-деталь значительно меньше, чем контактное сопротивление между деталями, и характеризуется относитель-

ной стабильностью, можем считать, что в пределах контактного пятна верхняя часть детали 1 (рис. 1) под окисной плёнкой практически эквипотенциальна. Тогда под контактной поверхностью электрода будем иметь для потенциала следующее граничное условие

$$\varphi(z = \delta) = U_0 \frac{R_{\Sigma}}{\sqrt{(2R_{\Sigma} + 2R_{\text{ЭД}} + R_M)^2 + X_M^2}} \quad (12)$$

где  $U_0$  – напряжение холостого хода на электродах машины,  $R_M$  – сопротивление участка цепи от плоскости симметрии между деталями до верхней поверхности металла листа 1, – контактное сопротивление электрод-деталь,  $R_{\Sigma}$  и  $X_M$  – приведённые к вторичной цепи активное и индуктивное сопротивления сварочной машины соответственно. Величина  $R_M$ , в свою очередь определяется электрическим полем в свариваемой детали

$$R_{\Sigma} = \frac{\varphi(z = \delta)}{I_{\text{св}}}, \quad (13)$$

где ток  $I_{\text{св}} = 2\pi \int_0^L \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}(z = \delta) r dr$ .

На границах металла с воздушной средой имеем

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0, \quad (14)$$

где  $\vec{n}$  – нормаль к границе.

Граничные условия для температуры  $T$  на оси симметрии и в плоскости симметрии имеют вид

$$\frac{\partial T}{\partial r}(r = 0) = 0, \quad (15)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(z = 0) = R_1 j_z^2(z = 0). \quad (16)$$

Значение температуры на удалённой границе ( $r = L$ ) мало отличается от температуры среды. Однако с целью повышения точности модели будем полагать

$$T(r = L) = T_A \quad (17)$$

где  $T_A$  рассчитывается согласно аналитической модели температурного поля при ТКС [1].

На верхней плоскости детали 1 можем записать

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(z = 0) = \alpha_1 (T(z = \delta) - T_C), \quad (18)$$

где  $T_C$  – температура окружающей среды,  $\alpha_1$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи.

Численные значения последнего в контакте с электродом задаются согласно [6], а на свободной поверхности согласно [1].

Граничные условия для скорости движения расплава  $\vec{W}$  можем определить исходя из того, что на границе с твёрдой фазой выполняются условия прилипания (скорость равна нулю), а на оси симметрии ( $r=0$ ) и в плоскости  $z=0$  выполняются условия симметрии

$$W_r(r = 0) = 0, \quad \frac{\partial W_z}{\partial r}(r = 0) = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial z}(z = 0) = 0, \quad W_z(z = 0) = 0, \quad (20)$$

где  $W_r$  и  $W_z$  радиальная и аксиальная компоненты вектора  $\vec{W}$  соответственно.

Плотность джоулевых источников теплоты и плотность электромагнитной силы, необходимые для решения температурной и гидродинамической задач, при известном поле потенциалов рассчитываются по формулам (2)-(5).

Интегрирование дифференциальных уравнений (1), (3), (6) и системы (7)-(8) выполняется численно, методом сеток. Поскольку граничные условия (10) и (12)-(13) являются нелинейными, значения потенциала на границах области уточняются итерационно.

### Основные результаты численного моделирования процесса формирования сварного соединения при точечной контактной сварке.

С использованием описанной выше модели были рассчитаны электромагнитное и температурное поля, а также поле скоростей движения жидкого металла для случая сварки пластин толщиной 2 мм из низкоуглеродистой стали 08 кп. Усилие сжатия на электродах полагалось равным 4000 Н, напряжение холостого хода – 4,8 В, активное и реактивное сопротивления машины, приведенные ко вторичному контуру, – по 158 мкОм. Теплофизические свойства металла задавались согласно [11], вязкость жидкого металла – согласно [12].

Электрическое поле в свариваемом металле сразу после подачи напряжения на электроды сварочной машины показано на рис. 2.

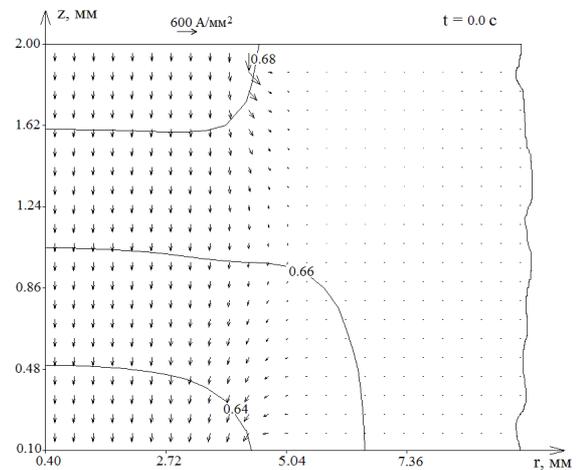


Рис. 2. Электрическое поле в свариваемых деталях в момент включения тока (эквипотенциальные линии приведены в вольтах)

В этот момент падение напряжения на холодных свариваемых деталях значительно меньше падения напряжения на контакте «деталь-деталь». Высокие значения плотности тока наблюдаются на периферии контакта «электрод-деталь». Неравномерность распределения тока в контакте «деталь-деталь» менее выражена ввиду значительного сопротивления последнего. Однако такой неравномерности распределения плотности тока достаточно для более интенсивного нагрева периферийных

участков контакта между деталями, что приводит к быстрому исчезновению контактного сопротивления на этих участках. Именно здесь спустя 0.02с после включения сварочного тока потенциал стремится к нулю и наблюдается большие значения плотности тока (рис. 3, а). Такое токораспределение формирует кольцеобразную зону относительно высоких температур (рис. 3, б).

На момент отключения сварочного тока ( $t = 0.24с$ ) электрическое поле в металле (рис. 4, а) обусловлено как геометрическим, так и температурным факторами. Расчётное значение силы тока к этому моменту составило 13,5 кА. Характерны относительно большие перепады потенциала в области, заполненной жидким металлом с высоким электрическим сопротив-

лением. Температурное и гидродинамическое поля на момент отключения тока приведены на рис. 4, б. В области формирования литого ядра температура распределена по толщине детали весьма неравномерно, однако на значительном удалении от оси симметрии перепад температур по толщине металла практически отсутствует. Движение жидкой фазы в данном случае организовано в виде одного вихря. В течение некоторого времени после отключения сварочного тока циркуляция расплава продолжается по инерции. Согласно результатам вычислительного эксперимента спустя 0.01с после отключения тока характерные скорости движения металла снижаются примерно в 20 раз, а ещё через 0.01с движение расплава практически прекращается.

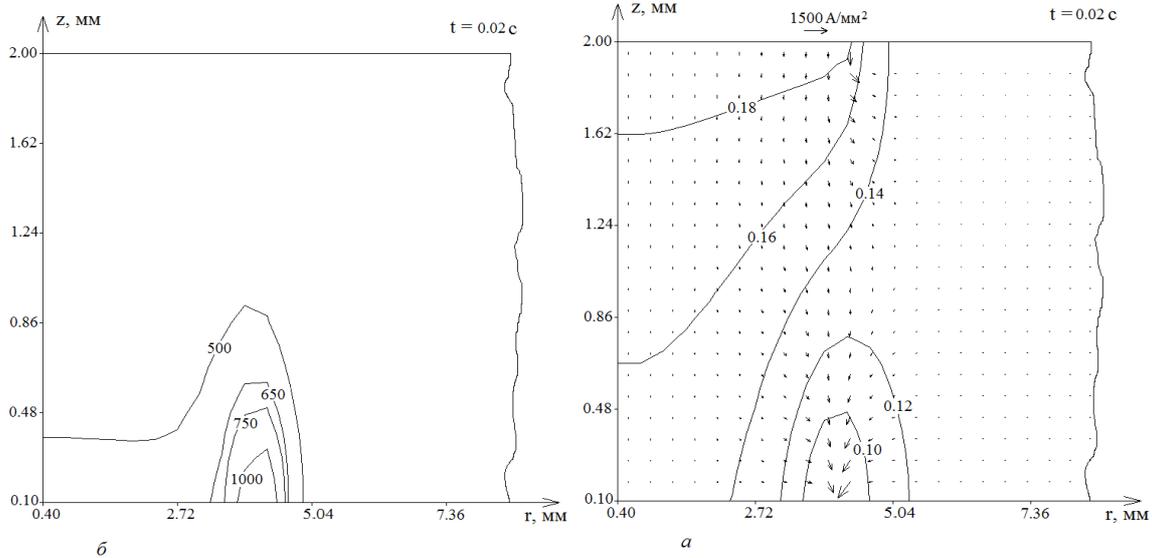


Рис. 3. Электрическое (а) и температурное (б) поля в свариваемых деталях при длительности протекания тока 0.02с (эквипотенциальные линии приведены в вольтах, изотермы – в кельвинах)

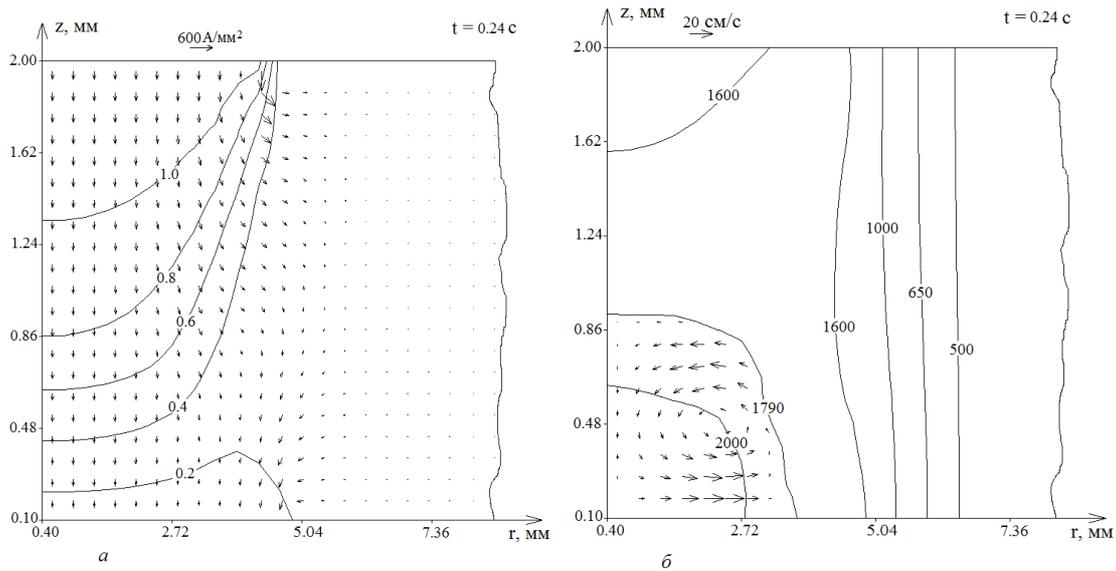


Рис. 4. Электрическое (а) и температурное (б) поля в свариваемых деталях при длительности протекания тока 0.24с (эквипотенциальные линии приведены в вольтах, изотермы – в кельвинах)

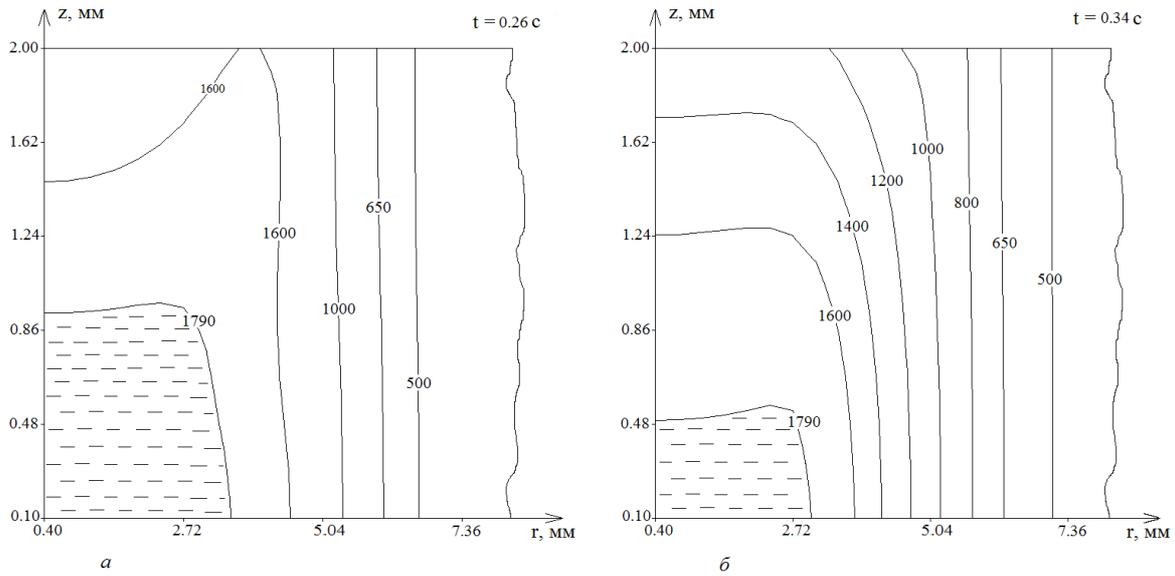


Рис. 5. Температурное поле (кельвины) в свариваемых деталях на этапе кристаллизации литого ядра:  $a$  – 0.02 с после отключения тока;  $b$  – 0.1 с после отключения тока

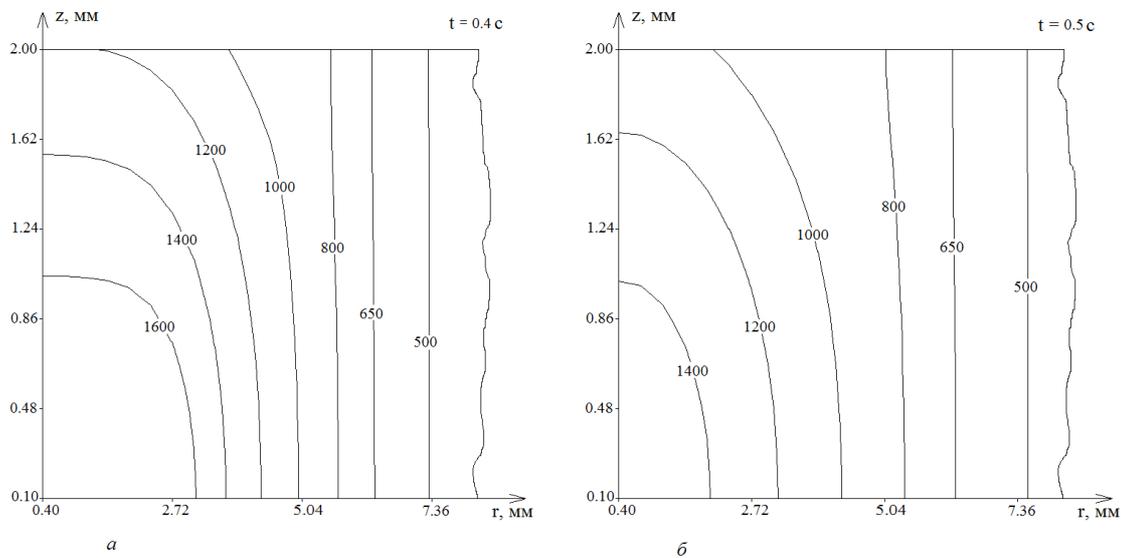


Рис. 6. Температурное поле (кельвины) в свариваемых деталях после завершения кристаллизации литого ядра:  $a$  – 0.16 с после отключения тока;  $b$  – 0.26 с после отключения тока

Температурные поля в металле на этапе кристаллизации литого ядра приведены на рис. 5. Характерно, что в течение 0,02 с после отключения тока объём расплавленного металла продолжает увеличиваться, а температура жидкой фазы быстро выравнивается. Спустя 0.16 с после отключения тока литое ядро полностью кристаллизуется.

После завершения кристаллизации литого ядра

(рис. 6) температура в деталях постепенно выравнивается. Значительные перепады температур по толщине листов на этом этапе сохраняются вблизи оси симметрии благодаря интенсивному отводу теплоты в электроды.

**Выводы.** Предложенная математическая модель позволяет рассчитывать температурные поля в изделиях, свариваемых точечной контактной сваркой, для любых моментов времени, а, следовательно, определять

температурные циклы в металле и прогнозировать свойства получаемых сварных соединений.

Результаты моделирования процесса точечной контактной сварки свидетельствуют о том, что на ранних этапах формирования сварной точки максимальная температура наблюдается на периферии зоны контакта свариваемых деталей.

Расчётным путём установлено, что максимальный объём жидкой фазы достигается спустя некоторое время после отключения сварочного тока, которое в случае сварки деталей толщиной 2мм из низкоуглеродистой стали составляет примерно один период переменного тока промышленной частоты.

Характерные скорости движения металлического расплава после отключения тока быстро снижаются и для упомянутых выше условий эксперимента на момент начала кристаллизации литого ядра циркуляция жидкой фазы практически отсутствует.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкалин Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. – М.: Машиностроение, 1951. – 296 с.
2. Гельман А. С. Технология и оборудование контактной электросварки. – М.: Машиностроение, 1960. – 368 с.
3. Каганов Н.Л. Расчётно-экспериментальный метод выявления требуемой геометрии импульса при конденсаторной сварке // Технология и автоматизация процессов сварки и пайки. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 150-157.
4. Крикент И.В. Применение вычислительной техники при расчётах режимов сварки давлением в курсовом и дипломном проектировании // Проблемы математического моделирования: Тезисы доповідей міждержавної науково-методичної конференції, Дніпродзержинськ, 29-31 травня 2002 р. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2002. – С. 190.
5. Быковский О.Г. Горбунов А.Д. Математическое моделирование теплового состояния металла при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 1990. – № 6. – С. 36-38.
6. Крикент И.В. Расчётное определение длительности протекания сварочного тока при точечной контактной сварке // Наука – производству. – К.: Вища школа, 1991. – С. 100-105.
7. Tsai C.L., Jammal O.A., Papritan C., Dickinson D.W. Modeling of resistance spot welding nugget growth // Welding Journal. – 1992. – 71(2). – P. 47-54.
8. Sun X., Dong P. Analysis of aluminum resistance spot welding processes using coupled finite element procedures // Welding research supplement. – 2000. – No.8. – P. 215-221.
9. Hamed M., Pashazadeh H. Numerical study of nugget formation in resistance spot welding // International Journal of mechanics. – 2008. – Iss.1.-2. – P. 11-15.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. – М.: Наука, 1986. – Т. VI. Гидродинамика. – 736 с.
11. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство. – М.: Металлургия, 1964. – 451 с.
12. Размышляев А.Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке. – Мариуполь: ПГТУ, 2000. – 245 с.

пост. 05.07.11