



ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА НА ВЕЛИЧИНУ УСИЛИЯ ОСАДКИ И ВРЕМЯ ПРОКОВКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ПЛОСКОГО КОЛЬЦА

А. В. МОЛТАСОВ, С. М. САМОТРСЯСОВ, В. В. КНЫШ, П. Н. ЧВЕРТКО, К. В. ГУЩИН
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одной из причин возникновения напряжений и перемещений в кольцах, изготавливаемых контактной стыковой сваркой, является неоднородное температурное поле, которое возникает в результате шунтирования электрического тока. В рамках настоящей работы были экспериментально измерены температуры в различных характерных точках на конечной стадии процесса выполнения контактной стыковой сварки стального кольца на машине К724. Измерения показали, что на исследуемой стадии процесса сварки температуры контролируемых точек мало изменяются во времени, т. е. имеет место квазистационарный тепловой поток. Функция температуры была задана в виде ряда Фурье по окружной координате, причем вследствие симметрии не принимались во внимание нечетные члены этого ряда. Оказалось достаточным ограничиться четырьмя первыми членами ряда. Изменение температур в радиальном направлении, установленное из условий стационарности теплового потока, показало, что действие температурного поля в кольце препятствует сближению свариваемых кромок. Это приводит к тому, что часть усилия осадки расходуется на обеспечение преодоления сил упругости, вызванных неравномерностью нагрева. Для рассмотренного в работе кольца из стали 20 усилие осадки, необходимое для формирования соединения увеличилось на 16,5 %. Кроме того, наличие температурных напряжений увеличивает усилие, стремящееся разорвать стык после сварки, что приводит к необходимости продления времени проковки стыка на 4 с. Библиогр. 7, рис. 4.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, плоские кольца, температурное поле, стационарный тепловой поток, температурные напряжения, усилие осадки, время проковки

Одним из наиболее эффективных способов соединения элементов конструкций кольцевой формы является контактная стыковая сварка (КСС). Машины для КСС [1] обеспечивают различную величину усилия осадки для сварки изделий. При разработке технологических режимов сварки необходимо определить величину усилия сближения для обеспечения достаточного усилия осадки и преодоления сопротивления кольца деформации. Кроме того, в работе [2] было показано, что для условий сварки колец со значительной упругостью следует учитывать возможность разрыва сварного стыка за счет упругости самого кольца, если давление осадки будет слишком быстро снижаться после выключения тока.

Ранее при определении времени проковки сварного стыка считалось [2], что величина усилия, стремящегося разорвать сварное соединение, зависит только от сил упругости шунтирующей части кольца, которые стремятся придать кольцу форму, которую оно имело в холодном состоянии до соединения свариваемых кромок. Однако при этом не учитывались напряжения и перемещения, обусловленные неравномерностью температурного поля, которое возникает при выполнении процесса сварки в результате шунтирования электрического тока. Температуры этого поля достигают своего максимального значения на конечной ста-

дии процесса сварки, а затем при остывании начинают медленно убывать. Поэтому данная работа посвящена исследованию влияния температурного поля, которое реализуется в сваренном кольце на конечной стадии процесса контактной сварки, на величину усилия осадки и усилия, стремящегося разорвать стык.

Экспериментальные измерения (рис. 1) показали, что в процессе нагрева и остывания кольца, выполненного КСС, возникает температурное поле, которое является функцией как радиальной r , так и окружной θ координаты.

Неравномерность распределения температуры в окружном направлении при КСС колец также наблюдается визуально (рис. 2). Отчетливо видно, что участок свариваемого кольца, наиболее удаленный от зажимных устройств сварочной машины, имеет более яркое свечение, чем участки шунтирующей части, близкие к ним. Это объясняется тем, что зажимные устройства обеспечивают высокий теплоотвод.

Изменение температур в контролируемых точках на конечной стадии процесса сварки незначительно (рис. 1, б), поэтому, не внося весомой погрешности, можно считать, что температура не зависит от времени, т. е. реализуется квазистационарный тепловой поток [3].

Представим температуру в виде ряда Фурье

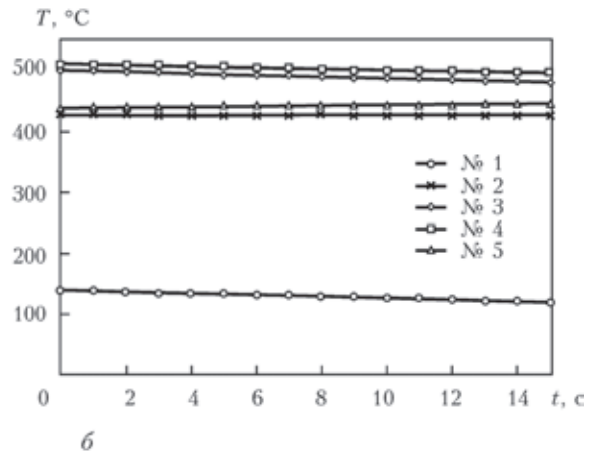
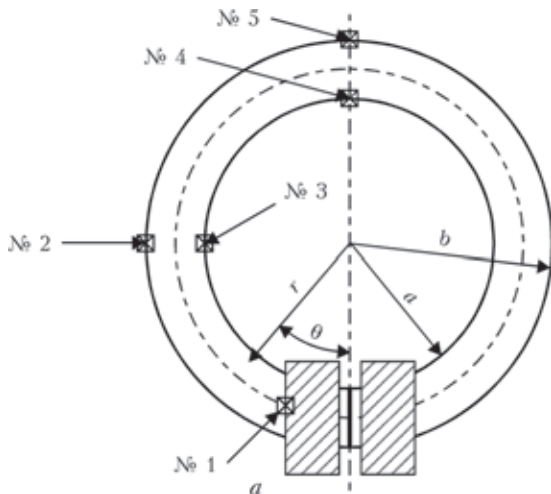


Рис. 1. Схема расположения точек контроля температур на конечной стадии процесса сварки кольца (а) и зависимость температур контролируемых точек от времени (б)

$$T(r, \theta) = A_0(r) + \sum_1^n A_n(r) \cos n\theta, \quad (1)$$

члены, пропорциональные $\sin \theta$, отброшены, так как в нашем случае температура распределяется симметрично относительно стыка.

Для описания реального распределения температур ограничимся четырьмя первыми членами, входящими в ряд (1), который примет вид

$$T(r, \theta) = A_0(r) + A_1(r) \cos \theta + A_2(r) \cos 2\theta + A_3(r) \cos 3\theta. \quad (2)$$

Этот ряд соответствует экспериментально установленным значениям в контролируемых точках (рис. 1), если он удовлетворяет две системы уравнений при $r = a$ и $r = b$

$$\begin{cases} A_0(a) + A_1(a) + A_2(a) + A_3(a) = T_1, \\ A_0(a) - A_2(a) = T_3, \\ A_0(a) - A_1(a) + A_2(a) - A_3(a) = T_4; \\ A_0(b) + A_1(b) + A_2(b) + A_3(b) = T_1, \\ A_0(b) - A_2(b) = T_2, \\ A_0(b) - A_1(b) + A_2(b) - A_3(b) = T_5, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_1 - T_5$ — экспериментальные значения температур в точках № 1–5 соответственно (рис. 1, а).

Решение систем (3) имеет вид

$$\begin{aligned} A_0(a) &= \frac{T_1 + T_4}{4} + \frac{T_3}{2}, \quad A_1(a) + A_3(a) = \frac{T_1 - T_4}{2}, \\ A_2(a) &= \frac{T_1 + T_4}{4} - \frac{T_3}{2}, \\ A_0(b) &= \frac{T_1 + T_5}{4} + \frac{T_2}{2}, \quad A_1(b) + A_3(b) = \frac{T_1 - T_5}{2}, \\ A_2(b) &= \frac{T_1 + T_5}{4} - \frac{T_2}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Нетрудно заметить, что количества уравнений в системах (3) недостаточно для определения значений всех переменных. Поэтому одна из переменных A_1 или A_3 является свободной. Эти пере-

менные следует выбирать таким образом, чтобы температура монотонно возрастала в интервале изменения θ от 0 до π и монотонно убывала в интервале изменения θ от π до 2π .

Подставив экспериментальные значения температур $T_1 = 130^\circ\text{C}$, $T_2 = 430^\circ\text{C}$, $T_3 = 480^\circ\text{C}$, $T_4 = 510^\circ\text{C}$, $T_5 = 450^\circ\text{C}$ в систему (3) и выбрав переменную A_3 соответствующим образом, получим зависимости, описывающие изменения температуры в окружном направлении на внешнем и внутреннем контуре

$$T(a, \theta) = 400 - 171 \cos \theta - 80 \cos 2\theta - 19 \cos 3\theta,$$

$$T(b, \theta) = 360 - 143 \cos \theta - 70 \cos 2\theta - 17 \cos 3\theta,$$

которые представлены графически (рис. 3).

Изменение температуры в радиальном направлении определяли из условий стационарности теплового потока [4]

$$\nabla_1^2 T(r, \theta) = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0. \quad (5)$$

Условие (5) выполнимо, если каждое из слагаемых в правой части (2) удовлетворяет это условие

$$\begin{aligned} \nabla_1^2 [A_0(r)] &= 0; \quad \nabla_1^2 [A_1(r) \cos \theta] = 0; \\ \nabla_1^2 [A_2(r) \cos 2\theta] &= 0; \quad \nabla_1^2 [A_3(r) \cos 3\theta] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$



Рис. 2. Контактная стыковая сварка стального кольца ($a = 135$ мм, $b = 190$ мм) на машине К724

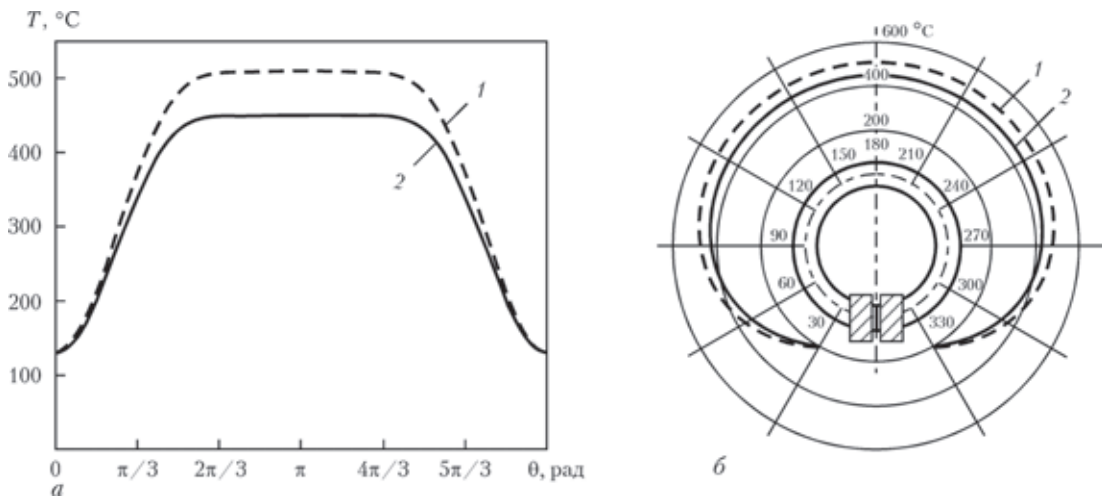


Рис. 3. Графики зависимости температуры от окружной координаты при $r = a$ (кривая 1) и при $r = b$ (кривая 2) в декартовых (а) и полярных (б) координатах

Решения уравнений (6) представим в виде

$$\begin{aligned} A_0(r) &= K_0 + H_0 \ln r, A_1(r) = K_1 r + \frac{H_1}{r}, \\ A_2(r) &= K_2 r^2 + \frac{H_2}{r^2}, A_3(r) = K_3 r^3 + \frac{H_3}{r^3}, \end{aligned} \quad (7)$$

где K_i, H_i — константы интегрирования, определяемые из условий $A_0(r) = A_0(a), A_1(r) = A_1(a), A_2(r) = A_2(a), A_3(r) = A_3(a)$ при $r = a, A_0(r) = A_0(b), A_1(r) = A_1(b), A_2(r) = A_2(b), A_3(r) = A_3(b)$ при $r = b$:

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{A_0(a) \ln b - A_0(b) \ln a}{\ln b - \ln a}; \\ K_1 &= \frac{1}{b^2 - a^2} (bA_1(b) - aA_1(a)); \\ K_2 &= \frac{1}{b^4 - a^4} (b^2 A_2(b) - a^2 A_2(a)); \\ K_3 &= \frac{1}{b^6 - a^6} (b^3 A_3(b) - a^3 A_3(a)); \\ H_0 &= \frac{A_0(b) - A_0(a)}{\ln b - \ln a}; \\ H_1 &= \frac{ab}{b^2 - a^2} (bA_1(a) - aA_1(b)); \\ H_2 &= \frac{a^2 b^2}{b^4 - a^4} (b^2 A_2(a) - a^2 A_2(b)); \\ H_3 &= \frac{a^3 b^3}{b^6 - a^6} (b^3 A_3(a) - a^3 A_3(b)). \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, функция, описывающая изменение температур в кольце $T(r, \theta)$, определена. Для экспериментальных данных, соответствующих изменению температуры в окружном направлении (рис. 3), построены графики изменения температур в радиальном направлении для различных значений θ (рис. 4).

Определение температурных напряжений, действующих в плоском кольце на конечной стадии КСС, сводится к решению двумерной задачи термоупругости со стационарным тепловым потоком. Для решения данной задачи

используется аналогия между квазистатической задачей термоупругости и задачей изотермической теории упругости с соответствующими объемными и поверхностными силами, рассмотренная в работе [5].

Поскольку в [6] доказано, что члены ряда (1) при $n > 1$ не оказывают влияния на напряженное состояние, компоненты напряжений имеют вид

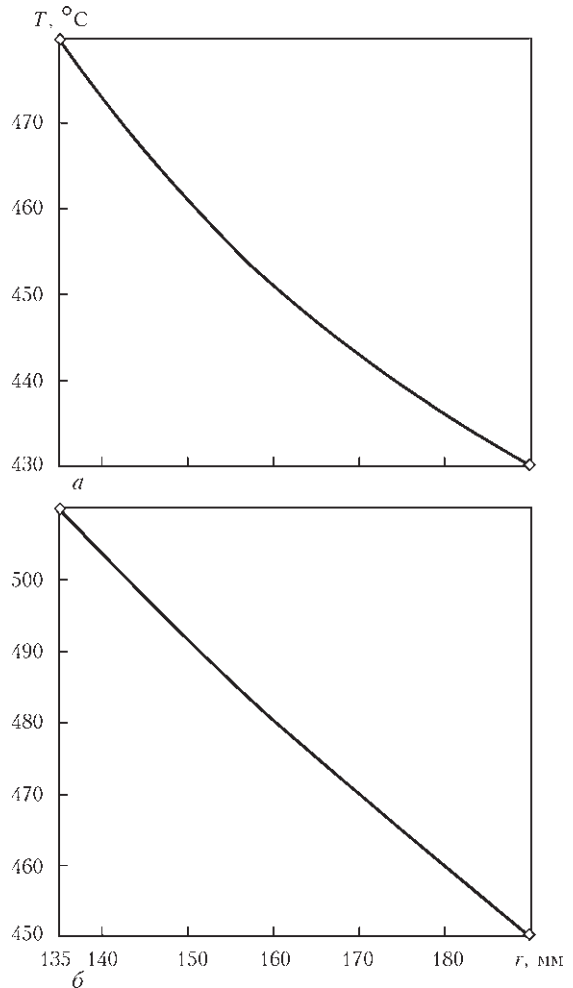


Рис. 4. Зависимость температуры от радиальной координаты для $\theta = \pi/2$ (а) и $\theta = \pi$ (б)



$$\begin{aligned} \sigma_r &= B_0 \frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(1 + 2 \ln r) + \\ &+ \left(2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \cos \theta, \\ \sigma_\theta &= -B_0 \frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(3 + 2 \ln r) + \\ &+ \left(6B_1 r + \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \cos \theta, \\ \tau_{r\theta} &= \left(2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \sin \theta, \end{aligned} \quad (9)$$

где B_0, C_0, D_0 и B_1, C_1, D_1 — постоянные интегрирования, в нашем случае

$$\begin{aligned} B_0 &= -\frac{\alpha E H_0}{2(b^2 - a^2)} a^2 b^2 \ln \frac{b}{a}, B_1 = \frac{\alpha E H_1}{4(a^2 + b^2)}, \\ C_0 &= \frac{\alpha E H_0}{4} \frac{b^2 \ln b - a^2 \ln a}{b^2 - a^2} + \frac{\alpha E H_0}{8}, \\ C_1 &= -\frac{\alpha E H_1}{4(a^2 + b^2)} a^2 b^2, \\ D_0 &= -\frac{\alpha E H_0}{4} D_1 = -\frac{\alpha E H_1}{2}, \end{aligned}$$

где α — коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$.

В работе [7] установлено, что усилие осадки и усилие, стремящееся разорвать стык после сварки, связано с величиной зазора δ_y , который представляет собой сумму первоначального зазора между свариваемыми кромками и укорочения каждого из концов в результате оплавления и осадки. Однако поскольку кольцо нагрето, к величине зазора необходимо добавить также смещения свариваемых кромок, вызванные неравномерностью нагрева.

Как показано в работе [6], наличие напряжений (9) в сплошном кольце эквивалентно смещению кромок кольца с зазором в окружном направлении

$$\delta_r = -2\pi\alpha(H_0 \frac{a+b}{2} + H_1), \quad (10)$$

причем если δ_r положительна, то зазор увеличивается, если отрицательна, то он уменьшается.

Если подсчитать величины H_0 и H_1 , которые соответствуют экспериментальным данным по формулам (8), то δ_r положительное, т. е. зазор увеличивается. Этот результат соответствует данным исследований, проведенных в работе [6], где доказано, что если в трубе с разрезом температура внутренней поверхности выше чем, температура внешней, то расстояние между берегами разреза увеличивается.

Усилие осадки рассчитано по формулам [7], а время проковки — по данным работы [2] с учетом

смещения свариваемых кромок, вызванного неравномерностью нагрева, и без его учета.

Для исследуемого стального кольца (сталь 20, $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа) смещение, вызванное неравномерностью нагрева, составило 3,57 мм, что привело к увеличению как необходимого усилия осадки на 16,5 %, так и времени проковки на 4 с.

Выводы

1. Показано, что ряды Фурье могут быть эффективно использованы для описания плоских температурных полей. В частности, для температурного поля, которое реализуется при остывании кольца, выполненного КСС, достаточная точность описания этого поля обеспечивается, если ограничиться четырьмя первыми членами этого ряда.

2. Установлена аналитическая зависимость, описывающая температурное поле в плоском кольце, которое реализуется на конечной стадии процесса КСС. Для стального кольца с внутренним радиусом $a = 135$ мм и внешним радиусом $b = 190$ мм построены графики распределения температур в радиальном и окружном направлениях.

3. Обосновано и подтверждено расчетами, что часть усилия осадки, необходимого для формирования соединения, расходуется на обеспечение преодоления сил упругости, вызванных неравномерным нагревом. Поэтому для рассмотренного в работе случая силы упругости, вызванные неравномерным нагревом, приводят к необходимости увеличения усилия осадки на 16,5 %. Наличие температурных напряжений во время остывания кольца также приводит к незначительному возрастанию усилия, действующего в сварном соединении, из-за чего время проковки необходимо продлить на 4 с.

1. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. — 2013. — № 7. — С. 3–7.
2. Кочергин К. А. Выбор технологии контактной сварки. — Л.: Судпромгиз, 1952. — 110 с.
3. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
4. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений / Под ред. Э. И. Григолюка. — М.: Мир, 1964. — 518 с.
5. Тимошенко С. П. Теория упругости. — Л.; М.: ОНТИ, 1937. — 452 с.
6. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
7. Чвертко П. Н., Молтасов А. В., Самотрясов С. М. Расчет усилия осадки при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы // Автомат. сварка. — 2014. — № 1. — С. 50–53.

Поступила в редакцию 24.03.2014