



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ, ВЫЗВАННОГО НАГРЕВОМ КОЛЬЦЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

**А.В. МОЛТАСОВ, К.В. ГУЩИН, И.Н. КЛОЧКОВ, П.Н. ТКАЧ, А.И. ТАРАСЕНКО**  
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы усилие, которое должна обеспечить сварочная машина для качественного формирования сварного соединения в твердой фазе, определяется не только усилием осадки, но и усилием, затрачиваемым на изгиб самой детали, а также усилием, вызванным нагревом шунтирующей части. Поэтому при выборе оборудования для сварки того или иного изделия замкнутой формы необходимо определить суммарное усилие, которое должна обеспечить сварочная машина. Проведены экспериментальные измерения температуры в различных характерных точках на конечной стадии процесса выполнения контактной стыковой сварки кольца из материала сталь 20 на машине К-724. Было установлено, что температура в шунтирующей части изменяется как по окружной, так и по радиальной координате. Поскольку определение силовых параметров контактной стыковой сварки основано на решении соответствующих задач теории упругости, необходимо задать температуру в виде непрерывной функции координат. При решении этих задач в полярных или цилиндрических координатах наиболее удобной для описания изменения температуры является четная часть ряда Фурье по окружной координате. Существующая методика описания температурного поля была усовершенствована таким образом, что при определении коэффициентов Фурье использовались не только экспериментальные данные, но и данные, полученные путем компьютерного моделирования. Это позволило использовать для описания температурного поля неограниченное количество членов аппроксимирующего ряда. На основании постулатов предложенной модели была получена функция общего вида, которая позволяет определить температуру в любой точке шунтирующей части при использовании неограниченного количества членов аппроксимирующего ряда. Приведено выражение для определения усилия, вызванного нагревом шунтирующей части. Проведен расчет силовых параметров контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением исследуемого кольца. В результате было установлено, что усилие, вызванное нагревом шунтирующей части, составило 9,1 % суммарного усилия, необходимого для качественного формирования соединения. Величина температурного усилия связана с величиной эквивалентного температурного перемещения. Расчетное значение этого перемещения, соответствующее предложенной модели, хорошо согласуется с результатами численного моделирования температурных перемещений в свариваемой заготовке. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 3.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, кольцевые изделия, токи шунтирования, температурное поле, ряды Фурье, температурное усилие

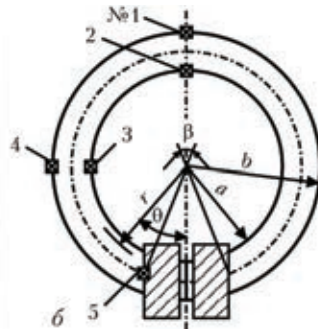
Преимущества контактной стыковой сварки (КСС) обуславливают ее широкое применение в сварочном производстве при изготовлении таких элементов конструкций, как шпангоуты, бандажи, поворотные круги, кольца жесткости, ободья колес и другие изделия замкнутой формы [1].

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины был разработан ряд машин для КСС кольцевых изделий, которые способны развивать усилие от нескольких десятков до нескольких тысяч килоньютонеров [2], при этом некоторые из них также имеют ограничения по минимальному внутреннему диаметру свариваемого изделия [3]. Поэтому перед производителем часто стоит сложная задача по выбору оптимального оборудования из существующего ряда машин для сварки того или иного кольцевого изделия.

При КСС деталей незамкнутой формы силовые параметры определяются удельным давлением осадки материала детали и площадью ее поперечного сечения [4]. В процессе КСС кольцевых из-

делий происходит изгиб самой детали и шунтирование электрического тока через нее [5].

В работе [6] было доказано, что нагрев шунтирующей части способствует возникновению температурных напряжений, которые оказывают влияние на величину усилия, необходимого для формирования качественного сварного соединения при КСС. Однако методика описания температурного поля, продемонстрированная в данной работе, дает возможность использовать ограниченное количество членов ряда, при помощи которых не всегда возможно получить желаемую точность. Кроме того, не было приведено выражение для усилия, которое создают температурные напряжения в шунтирующей части. Поэтому целью настоящей работы является усовершенствование методики описания температурного поля и определение усилия, вызванного нагревом шунтирующей части. Экспериментальные измерения температур проводились при КСС кольца из стали



Номер точки	$\theta$ , рад	$T$ , °С
1	$\pi$	460
2	$\pi$	510
3	$\pi/2$	480
4	$\pi/2$	450
5	$\approx \pi/6$	130

Рис. 1. Заготовка кольца в зажимных устройствах сварочной машины К-724 (а) и схема расположения точек (1–5) контроля температур (б)

20 сечением  $55 \times 25 \text{ мм}^2$  и внутренним диаметром 270 мм (рис. 1, а) в пяти контролируемых точках (рис. 1, б).

По результатам измерений установлено, что температура в шунтирующей части изменяется как по окружной  $\theta$ , так и по радиальной  $r$  координате. Поскольку определение усилия, вызванного нагревом шунтирующей части, основано на решении соответствующих задач теории упругости, необходимо задать температуру в виде непрерывной функции координат. При решении задач в полярных координатах наиболее удобной для описания изменения температуры является четная часть ряда Фурье по окружной координате  $\theta$

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

Для определения неизвестных коэффициентов Фурье  $A_n$  необходимо составить систему уравнений для значений температур в различных по окружной координате  $\theta$  точках шунтирующей части. Поскольку экспериментальные данные дают возможность установить только по три значения температур на внешнем и внутреннем диаметре, а именно  $T(\pi/6)$ ,  $T(\pi/2)$  и  $T(\pi)$ , то остальные можно определить путем компьютерного моделирова-

ния температурного поля (рис. 2, а). Количество уравнений системы определяет точность описания температурного поля. Использование первых шести членов ряда (таблица) дает возможность описать температурное поле с точностью до  $3 \text{ }^\circ\text{С}$ . Можно убедиться, что значения температур, взятые из графика (рис. 2, б), совпадают с результатами компьютерного моделирования.

Как видно (таблица), значение коэффициентов убывает по абсолютной величине, поэтому введение последующих коэффициентов не внесет весомой поправки в величины температур.

Изменение температур в радиальном направлении определяется из дифференциального уравнения теплопроводности [7]

$$\chi \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \quad (2)$$

где  $\chi$  — коэффициент температуропроводности.

Поскольку рассматривается температурное поле в момент, когда температуры достигают своего максимального значения, а не его изменение во времени, то левая часть уравнения (2) обращается в нуль, решение такого уравнения приведено в работе [6].

В результате была получена соответствующая предложенной модели функция общего вида, ко-

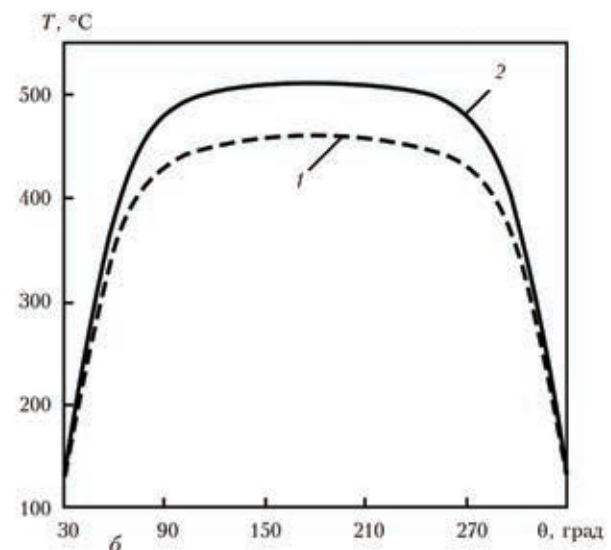
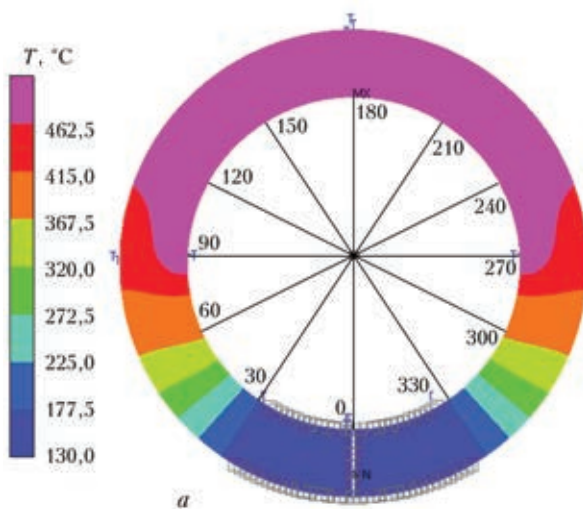


Рис. 2. Поля температур в кольце (а) и графики распределения температур по внешнему (кривая 1) и внутреннему (2) диаметру (б)



Расчетные коэффициенты Фурье в точках 1–5

Коэффициент	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
$T_{\text{внут. диам.}}^{\circ\text{C}}$	373	-221	-122,5	-51	-15	-3
$T_{\text{внеш. диам.}}^{\circ\text{C}}$	339	-192	-106,5	-48	-15	-3

торая позволяет определить температуру в любой точке шунтирующей части

$$T(r, \theta) = K_0 + H_0 \ln r + \sum_1^n \left( K_n r^n + \frac{H_n}{r^n} \right) \cos n\theta, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{A_0(a) \ln b - A_0(b) \ln a}{\ln b - \ln a}; \\ K_n &= \frac{A_n(b) \cdot b^n - A_n(a) \cdot a^n}{b^{2n} - a^{2n}}; \\ H_0 &= \frac{A_0(b) - A_0(a)}{\ln b - \ln a}; \\ H_n &= \frac{a^n b^n}{b^{2n} - a^{2n}} [A_n(a) \cdot b^n - A_n(b) \cdot a^n]. \end{aligned} \quad (4)$$

Методика определения напряжений, вызванных наличием температурного поля, которое описывается рядом Фурье, подробно изложена в работах [8, 9], компоненты напряжения имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_r &= B_0 \frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(1 + 2 \ln r) + \\ &+ \left( 2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \cos \theta; \\ \sigma_\theta &= -B_0 \frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(3 + 2 \ln r) + \\ &+ \left( 6B_1 r + \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \cos \theta; \\ \tau_{r\theta} &= \left( 2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r} \right) \sin \theta, \end{aligned} \quad (5)$$

где

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

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $E$  — модуль упругости материала.

Связь компонентов перемещения с компонентами напряжения была установлена в работе [10].

Таким образом, напряжения (5) в сплошном кольце эквивалентны окружному перемещению подвижной кромки кольца с зазором на величину

$$\delta_T = -(2\pi - \beta) \alpha \left( H_0 \frac{a+b}{2} + H_1 \right). \quad (6)$$

Поскольку в нашем случае, согласно (4),  $H_0$  и  $H_1$  отрицательны, то перемещение  $\delta_T$  направлено в сторону возрастания координаты  $\theta$ , т.е. равносильно увеличению зазора.

В нашем случае температурное перемещение составило 2,88 мм, для подтверждения этого результата было проведено численное моделирование полей перемещений в заготовке кольца при нагреве, аналогичном тому, который реализуется в шунтирующей части кольца при КСС (рис. 3).

По результатам численного моделирования было установлено, что температурное перемещение левой кромки составило 3,04 мм, что на 5,3 % превосходит величину, полученную аналитическим расчетом по формуле (6), соответствующей температурному полю (3).

Поскольку это перемещение направлено в противоположную сторону от того, которое совершает подвижное зажимное устройство сварочной машины, часть усилия расходуется на его преодоление. Связь между перемещением и соответствующим ему усилием была установлена в работе [10]. Таким образом, для предотвращения перемещения (6) необходимо приложить усилие

$$\begin{aligned} P_T &= -\alpha E t \frac{2\pi - \beta}{4\pi} \times \\ &\times \left( H_0 \frac{(b^2 - a^2)^2 - 4a^2 b^2}{2(a+b)(b^2 - a^2)} + H_1 \frac{a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a}}{a^2 + b^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Для исследуемого кольца был проведен расчет силовых параметров КСС пульсирующим оплавлением [11]. Усилие, затрачиваемое на изгиб де-

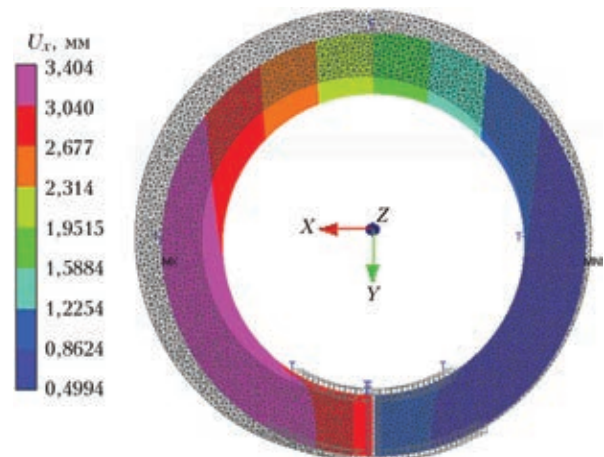


Рис. 3. Поле перемещений  $U$  в кольце (сеткой показано деформированное состояние)

тали, определяется по формуле, полученной в работе (10):

$$P_{\text{изг}} = -\frac{E\delta_{\Sigma}t}{4\pi(a^2 + b^2)} \left[ a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \right], \quad (8)$$

где  $\delta_{\Sigma}$  — сумма начального зазора  $\delta_{\text{нз}}$  и припусков на оплавление  $\delta_{\text{опл}}$  и осадку  $\delta_{\text{ос}}$ .

В результате было установлено, что температурное усилие составляет более 9 % суммарного усилия, которое должна обеспечить сварочная машина для формирования качественного сварного соединения в твердой фазе.

Расчет силовых параметров КСС исследуемого кольца пульсирующим оплавлением проводили при следующих исходных данных: внутренний диаметр 270 мм, сечение  $F = 55 \times 25 \text{ мм}^2$ ; удельное давление осадки  $p_{\text{ос}}$  — 40 МПа; модуль упругости 210 ГПа; коэффициент линейного расширения  $1,4 \cdot 10^{-5}$  1/град; начальный зазор  $\delta_{\text{нз}}$  — 2 мм; припуск на оплавление  $\delta_{\text{опл}}$  — 9 мм; припуск на осадку  $\delta_{\text{ос}}$  — 7 мм. Получили фиктивное смещение от нагрева  $\delta_{\text{т}}$  — 2,88 мм; температурное усилие  $P_{\text{т}}$  — 14,8 кН; усилие осадки  $P_{\text{ос}}$  — 55 кН; усилие изгиба  $P_{\text{изг}}$  — 92,6 кН; суммарное усилие  $P_{\Sigma}$  — 162,4 кН;  $P_{\text{т}}/P_{\Sigma}$  — 9,1 %.

#### Выводы

1. Усовершенствована методика, которая позволяет, на основании дискретных данных, полученных путем экспериментальных измерений и компьютерного моделирования, описать температурное поле в шунтирующей части при контактной стыковой сварке кольцевой заготовки в виде четной части ряда Фурье по окружной координате.

2. В соответствии с постулатами предложенной модели была получена функция общего вида, которая позволяет определить температуру в любой

точке шунтирующей части свариваемого кольца при использовании неограниченного числа членов ряда.

3. Впервые получено аналитическое выражение для определения действующего на стык усилия, вызванного нагревом шунтирующей части. Для кольца из материала сталь 20 внутренним диаметром 270 мм и сечением  $55 \times 25 \text{ мм}^2$  были рассчитаны силовые параметры КСС пульсирующим оплавлением. В результате было установлено, что усилие, вызванное нагревом шунтирующей части, составляет 9,1 % суммарного усилия, которое должна обеспечить сварочная машина.

1. Павличенко В.С. Контактная сварка изделий замкнутой формы. — М.: Машиностроение, 1964. — 114 с.
2. Кучук-Яценко С.И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
3. 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.
4. Гельман А.С. Технология контактной электросварки. — М.: Mashgiz, 1952. — 324 с.
5. Кабанов Н.С. Сварка на контактных машинах. — М.: Высш. шк., 1973. — 255 с.
6. Влияние неравномерности нагрева на величину усилия осадки и время проковки при контактной стыковой сварке плоского кольца / А.В. Молтасов, С.М. Самоотрясов, В.В. Кныш и др. // Автомат. сварка. — 2014. — № 10. — С. 13–16.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
8. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. — М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1975. — 576 с.
9. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений / Под ред. Э.И. Григolloка. — М.: Мир, 1964. — 518 с.
10. Чвертко П.Н., Молтасов А.В., Самоотрясов С.М. Расчет усилия осадки при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы // Автомат. сварка. — 2014. — № 1. — С. 50–53.
11. Пат. 46820 Украина. Способ контактной стыковой сварки / С.И. Кучук-Яценко, В.А. Дидковский, М.В. Богорский и др. — Оpubл. 17.06.2002.

Поступила в редакцию 11.02.2015

## ЗАКАЖИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ!

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас подписаться на бесплатное получение информационного бюллетеня журнала «Автоматическая сварка».

Для подписки необходимо выслать по электронной почте письмо с темой «Информационный бюллетень/АС» на адрес редакции журнала: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua).