



РАСЧЕТ УСИЛИЯ ОСАДКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ИЗДЕЛИЙ ЗАМКНУТОЙ ФОРМЫ

П. Н. ЧВЕРТКО, А. В. МОЛТАСОВ, С. М. САМОТРСЯСОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В элементах конструкций летательных аппаратов широко применяются кольцевые изделия из высоколегированных сталей и сплавов. Для производства таких конструктивных элементов применяются различные способы сварки плавлением, в том числе контактная стыковая сварка оплавлением. Технология контактной стыковой сварки таких изделий требует высоких скоростей осадки ≥ 50 мм/с с удельным усилием не менее 120...200 МПа. При контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы важно определить величину необходимого усилия осадки. При неограниченном или недостаточном усилии осадки не будут соблюдены необходимые условия формирования соединения в твердой фазе, а при перегреве укорочение детали будет слишком велико. И то, и другое приводит к нарушению формы кольцевых изделий, в частности, его периметра. В процессе сварки в свариваемом изделии возникают упругие усилия, препятствующие формированию соединения, которые необходимо определить при разработке технологии и оборудования для сварки. Кроме того, при сварке кольцевых заготовок большого сечения, отличающихся значительной упругостью, следует учитывать возможность разрыва сваренного стыка за счет упругости кольцевой заготовки при недостаточном времени осадки без протекания электрического тока. Расчет упомянутых выше усилий проводили по теории тонких стержней в условиях, когда напряженно-деформированное состояние считалось линейным. Также провели расчет данных усилий методами теории упругости, в результате была решена плоская задача теории упругости. Сравнение результатов расчета восьми колец с различными характерными размерами показало, что максимальное различие величин усилия осадки, рассчитанных по теории тонких стержней и формулам плоской задачи, составило около 2 %, а величины усилий, разрывающих стык после сварки, — менее 1 %. Причем, при уменьшении отношения внешнего радиуса кольца ко внутреннему его радиусу точность расчета по теории тонких стержней возрастает. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, кольца, высоколегированные стали, напряженно-деформированное состояние, усилие осадки, теория тонких стержней, плоская задача

В промышленности для производства деталей и конструкций замкнутой формы различного назначения (элементов двигателей, различных бандажей, поворотных кругов, подшипников, фланцев и пр.) применяют различные способы сварки (дуговую, электронно-лучевую, контактную и др.), от которых существенно зависят эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Одним из наиболее экономичных и технически простых процессов изготовления кольцевых заготовок является контактная стыковая сварка (КСС) [1]. Этот способ обеспечивает высокое стабильное качество сварных соединений, объединяет в едином цикле сварочные и сборочные операции и не требует применения вспомогательных расходных материалов (электродов, флюсов, сварочных проволок, защитных газов и т.д.).

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология и оборудование [2] для контактной стыковой сварки кольцевых изделий в промышленных условиях (рис. 1). В основу технологии положен способ контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением [3], который обеспечивает высококонцентрированный нагрев, вследствие чего уменьшается зона термического влияния (ЗТВ).

Расчетная схема нагружения кольца, на которое

действует усилие осадки P и реактивный момент от подвижного зажимного устройства установки M , соответствующая рис. 1, изображена на рис. 2. В качестве первого приближения можно предположить, что размеры поперечного сечения кольца малы по сравнению с его средним радиусом, тогда задача может быть решена по теории тонких стержней.

Для определения силы P целесообразно связать ее с величиной упругого перемещения δ_y от начального зазора до конечного положения с учетом укорочения детали вследствие оплавления и

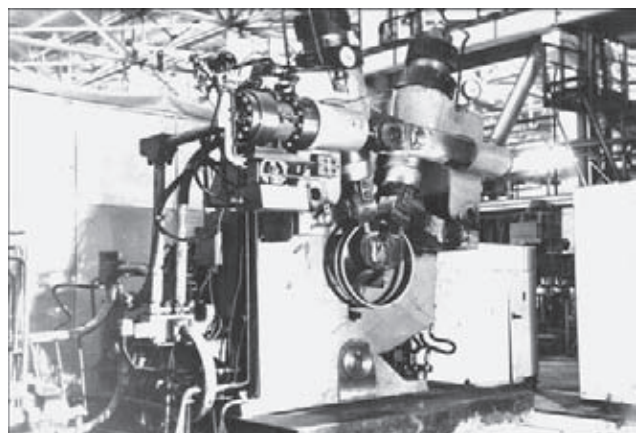


Рис. 1. Кольцевая заготовка в зажимных устройствах стыкосварочной машины K607

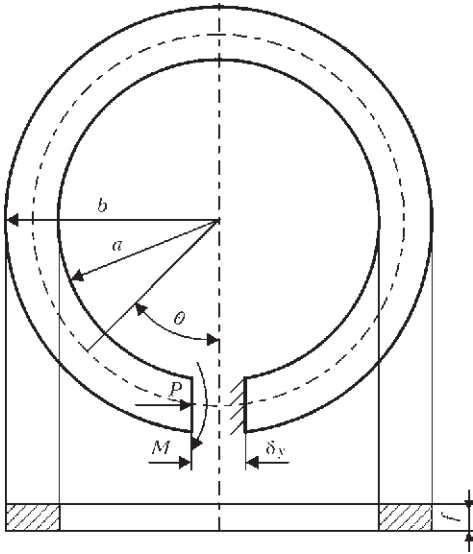


Рис. 2. Схема нагружения кольца при контактной стыковой сварке

осадки. Величину упругого перемещения в криволинейном контуре следует определять при помощи интегралов Мора:

$$\delta_y = \int_s \frac{\bar{M} \cdot M_p ds}{EI_z}, \quad (1)$$

где \bar{M} — выражение для момента от единичной силы, приложенной в направлении силы P ; M_p — выражение для момента от активных и реактивных сил; I_z — момент инерции сечения; E — модуль упругости первого рода.

Используя канонические уравнения метода сил [4] нашли величину реактивного момента $M = P(a + b)/2$. С учетом этого выражение для изгибающего момента в сечениях кольца имеет вид

$$M_p = \frac{1}{2} P(a + b) \cos \theta. \quad (2)$$

Выражение для определения момента от действия единичной силы $\bar{P} = 1$ записываем в виде

$$\bar{M} = \frac{1}{2} (a + b) (1 - \cos \theta). \quad (3)$$

Подставив выражения (2) и (3) в (1), определили величину упругого перемещения

$$\delta_y = \frac{1}{EI_z} \left[2 \int_0^\pi \frac{1}{2} P(a + b) \cos \theta \frac{1}{2} (a + b) \times \right. \\ \left. \times (1 - \cos \theta) \frac{1}{2} (a + b) d\theta \right] = \frac{\pi P(a + b)^3}{8EI_z},$$

откуда можно получить усилие осадки

$$P = \frac{8EI_z}{\pi(a + b)^3} \delta_y. \quad (4)$$

Более точное решение этой задачи получаем, решая плоскую задачу теории упругости. Это решение принадлежит Х. С. Головину и подробно описано в работе [5], поэтому приводим только

выражения для напряжений

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\partial \varphi}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{r^2 \partial \theta^2} = \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r} \right) \cos \theta, \\ \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = \left(6Ar + \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r} \right) \cos \theta, \\ \tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \varphi}{r \partial \theta} \right) = \left(2Ar - \frac{2B}{r^3} + \frac{D}{r} \right) \sin \theta, \end{cases} \quad (5)$$

где A , B и D — постоянные, определяемые из граничных условий. В нашем случае они равны

$$A = -\frac{P}{2R}; \quad B = \frac{Pa^2b^2}{2R}; \quad D = \frac{P}{R}(a^2 + b^2), \quad (6)$$

причем

$$R = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a}.$$

В отличие от работы [5], где при рассмотрении перемещений использовали функции комплексного переменного, мы использовали методику, которая применялась в [6] при решении задачи о действии касательной силы, приложенной на конце криволинейного стержня.

Компоненты деформации в полярных координатах имеют вид

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \theta}; \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}. \quad (7)$$

Через компоненты напряжения (5) компоненты деформации при плоском напряженном состоянии выражаются следующим образом:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\theta); \quad \epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \mu \sigma_r); \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{G}, \quad (8)$$

где

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

Сопоставив выражения для ϵ_r из (7) и (8) с учетом (5), после интегрирования получили

$$u = \frac{\cos \theta}{E} \left[Ar^2(1 - 3\mu) + \frac{B}{r^2}(1 + \mu) + \right. \\ \left. + D(1 - \mu) \ln r \right] + f(\theta), \quad (9)$$

где $f(\theta)$ — функция, зависящая только от аргумента θ , которая будет определена ниже. Полученное выражение (9) подставим в выражение для ϵ_θ из (7) с учетом (8), проинтегрировав, получаем

$$v = \frac{\sin \theta}{E} \left[Ar^2(5 + \mu) + \frac{B}{r^2}(1 + \mu) + \right. \\ \left. + D(1 - \mu)(1 - \ln r) \right] - \int f(\theta) d\theta + F(r), \quad (10)$$

где $F(r)$ — функция, зависящая только от аргумента r , которая также будет определена ниже. Подставив полученное выражение (10) вместе с выраже-



нием (9) в выражение для $\gamma_{r\theta}$ из (7) с учетом (8) получаем уравнение

$$\frac{4D \sin \theta}{E} = r \frac{dF}{dr} + \int f(\theta) d\theta - F(r) + \frac{df(\theta)}{d\theta},$$

которое должны удовлетворять функции $f(\theta)$ и $F(r)$. Эти функции были определены авторами в следующем виде:

$$f(\theta) = \frac{2D}{E} \theta \sin \theta + K \sin \theta + L \cos \theta; \quad F(r) = Hr, \quad (11)$$

где K, L, H – произвольные постоянные, определяемые из условий закрепления.

С учетом (11) выражения для компонент перемещения имеют вид

$$\begin{cases} u = \frac{2D}{E} \theta \sin \theta + \frac{\cos \theta}{E} \left[Ar^2(1-3\mu) + \frac{B}{r^2}(1+\mu) + D(1-\mu) \ln r \right] + K \sin \theta + L \cos \theta; \\ v = \frac{2D}{E} \theta \cos \theta + \frac{\sin \theta}{E} \left[Ar^2(5+\mu) + \frac{B}{r^2}(1+\mu) + D[(1-\mu)(1-\ln r) - 2] \right] + K \cos \theta - L \sin \theta + Hr. \end{cases} \quad (12)$$

Тангенциальное перемещение свободного конца можно получить, подставив в выражение для v значение $\theta = 0$, тогда

$$v(\theta = 0) = K + Hr. \quad (13)$$

Постоянные K, H определяются из условий на неподвижно закрепленном конце $\theta = 2\pi$, где имеем $v = 0, \partial v / \partial r = 0$. Подставив это в выражение для v из (12) определили неизвестные постоянные

$$K = -\frac{4\pi D}{E}; \quad H = 0. \quad (14)$$

Таким образом, используя формулы (6), найдем при $\theta = 0$

$$v = \delta_y = -\frac{4\pi P(a^2 + b^2)}{E \left[a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \right]}. \quad (15)$$

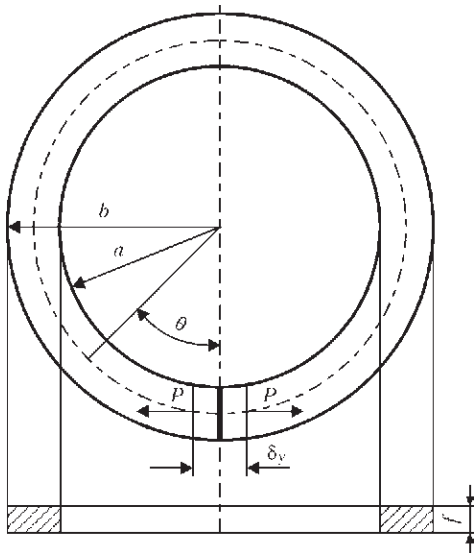


Рис. 3. Схема нагружения кольца после сварки

Из формулы (15) определяем усилие осадки

$$P = -\frac{E \delta_y t}{4\pi(a^2 + b^2)} \left[a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a} \right]. \quad (16)$$

Знак «-» свидетельствует о том, что направление перемещения v не совпадает с направлением возрастания θ . Следует отметить, что в формулу (16) введена толщина t , так как при решении плоской задачи мы получили бы силу на единицу толщины. Брак и дефекты при сварке в основном выявляются после операции калибровки или в процессе последующей механической обработки. Дефектными можно считать те кольца, в которых при снятии усилия осадки в стыке образуются трещины или происходит разрушение вдоль сварного стыка.

При определении усилия, стремящегося разорвать стык после сварки, необходимо учитывать, что при снятии усилия осадки реактивный момент перестает действовать, так как зажимное устройство, создающее данную реакцию, открыто. Таким образом, когда сварное изделие пытается вернуться к прежней геометрической форме, напряженное состояние обусловлено только действием силы P , направленной в противоположном направлении к усилию осадки (рис. 3).

Для решения этой задачи по теории тонких стержней достаточно в выражение (1) вместо (2) подставить

$$M_p = \frac{1}{2} P(a+b)(1 - \cos \theta), \quad (17)$$

тогда получим

$$\delta_y = \frac{1}{EI_z} \left[2 \int_0^\pi \frac{1}{2} P(a+b)(1 - \cos \theta) \frac{1}{2} (a+b) \times \right. \\ \left. \times (1 - \cos \theta) \frac{1}{2} (a+b) d\theta \right] = \frac{3\pi P(a+b)^3}{8EI_z},$$

откуда можно получить усилие, стремящееся разорвать стык после сварки

$$P = \frac{8EI_z}{3\pi(a+b)^3} \delta_y. \quad (18)$$

Как видно из выражения (18) в рамках теории тонких стержней усилие P , стремящееся разорвать стык после сварки, всегда в 3 раза меньше усилия осадки, определяемого по формуле (4).

Необходимо отметить, что формула (18) совпадает с формулой, полученной в работе [7] иным способом. Для решения задачи методами теории упругости необходимо вычесть из выражений (5) напряжения, возникающие под действием момента (рис. 4). Решение этой задачи также принадлежит Х. С. Головину и имеется в литературе [5, 6].

Результаты расчета усилий осадки и усилий, разрывающих стык после сварки

a , мм	b , мм	t , мм	δ_y , мм	$P_{св}$ (4), кН	$P_{св}$ (16), кН	$\Delta P_{св}$, %	$P_{разр}$ (18), кН	$P_{разр}$ (20), кН	$\Delta P_{разр}$, %
160	210	10	13	13,62	13,48	1,08	4,54	4,52	0,52
180	230	12	14	12,94	12,83	0,88	4,31	4,29	0,43
255	347	14	20	42,44	41,86	1,37	14,15	14,05	0,67
243	323	16	19	36,45	36,03	1,18	12,15	12,08	0,57
241	351	16	22	95,89	94,00	2,01	31,96	31,65	0,98
175	215	22	16	16,13	16,03	0,63	5,38	5,36	0,31
181	216	25	16	11,64	11,58	0,46	3,88	3,87	0,26
356	421	25	21	13,05	13,00	0,42	4,35	4,34	0,23

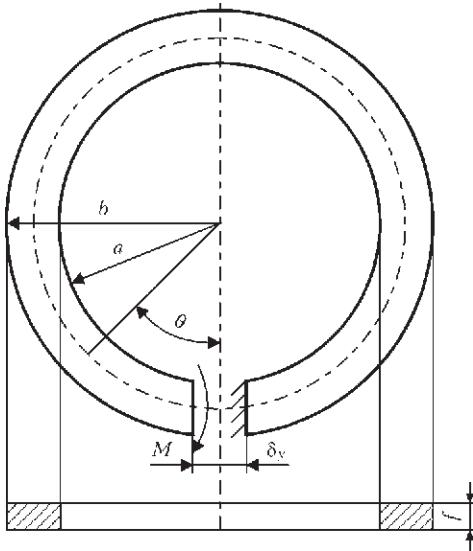


Рис. 4. Расчетная схема кольца, изгибаемого моментом в плоскости кривизны

$$v = \frac{8\pi M(a+b)(b^2 - a^2)}{E \left[(b^2 - a^2)^2 - 4a^2b^2 \left(\ln \frac{b}{a} \right)^2 \right]} \text{ при } \theta = 2\pi. \quad (19)$$

Величина упругой деформации δ_y состоит из перемещения, даваемого формулой (15), взятого с противоположным знаком, и перемещения, даваемого формулой (19). Имея в виду, что $M = P(a + b)/2$ и умножая на толщину t , получим выражение для силы, действующей на стык после сварки

$$P = \frac{E\delta_y t}{4\pi N}, \quad (20)$$

где

$$N = \frac{(a^2 + b^2)}{a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \ln \frac{b}{a}} + \frac{(a+b)^2(b^2 - a^2)}{(b^2 - a^2)^2 - 4a^2b^2 \left(\ln \frac{b}{a} \right)^2}.$$

Результаты расчетов для восьми типовых колец из стали 12Х18Н10Т ($E = 200000$ МПа), которые используются в элементах конструкций летательных аппаратов, производимых на ГП «ПО ЮМЗ им. А. М. Макарова», приведены в таблице.

В таблице приведены результаты расчета усилий осадки, рассчитанных по теории тонких

стержней (4) и с использованием методов теории упругости (16), максимальное отклонение $\Delta P_{св}$ составляет около 2 %. Аналогично при помощи формул (18) и (20) были рассчитаны усилия, стремящиеся разорвать стык после сварки, при этом максимальное отклонение $\Delta P_{разр}$ составило менее 1 %. Это свидетельствует о том, что в данном случае теория тонких стержней дает очень точные результаты. Кроме того, можно заметить, что ошибка уменьшается при уменьшении соотношения b/a (действительно, если b стремится к a , мы получим тонкий стержень и ошибка устремится к нулю).

Выводы

1. С использованием двух аналитических методов расчета получены выражения для определения усилия осадки, необходимого при контактной стыковой сварке кольцевых заготовок, и усилия, стремящегося разорвать стык после сварки.

2. Приведены результаты расчетов по формулам, полученным на основании разных расчетных методов, для восьми типовых колец. Максимальное отклонение значения усилия осадки составило около 2 %, для разрывающего усилия — менее 1 %.

3. Разработана технология и оборудование для промышленного изготовления колец из жаропрочных сплавов и сталей типа 12Х18Н10Т, ЭИ711 и ЭИ712 с диаметром срединной поверхности от 370 до 777 мм и площадью поперечного сечения от 500 до 1760 мм².

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
2. 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.
3. Пат. 46820 Украина. Способ контактной стыковой сварки / С. И. Кучук-Яценко, В. А. Дидковский, М. В. Богорский и др. — Опубл. 17.06.2002.
4. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.: Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1975. — 704 с.
5. Лурье А. И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940 с.
6. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
7. Кочергин К. А. Выбор технологии контактной сварки. — Л.: Судпромгиз, 1952. — 110 с.

Поступила в редакцию 25.08.2013