Д М25680

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СС

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Аспирант А. В. ВЕРШИНСКИЙ

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ОТ КРУГОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИХ В ЭЛЕМЕНТАХ МАЛЫХ ТОЛЩИН

№ 167. «Машины и технология сварочного производства»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
заслуженный деятель науки и
техники РСФСР,
д. т. н., проф. *Г. А. Николаев*,
к. т. н., доц. *В. М. Сагалевич*

Москва 1968

Работа выполнена в МВТУ им. Баумана.

Научные руководители: за
техники РСФСР, проф., д. т. н.
доц., к. т. н.

Официальные оппоненты:

Ведущее предприятие ука

Автореферат разослан „—

Защита диссертации сост

на заседании Ученого сове
МВТУ им. Баумана по адресу

С диссертацией можно оз

Секретарь Ученого Совета.

М25680

1025680
Вершинский А.В. Деформаци

Введение

Создание облегченных тонколистовых и тонкостенных конструкций летательных аппаратов, сварных узлов судов, вагонов и т. п. стало возможным благодаря широкому применению сварки — дуговой и контактной.

Однако сварка элементов малых толщин приводит к изменению формы и геометрических размеров деталей изделий, зачастую выходящих из проектных допусков. Разработке расчетных методов, позволяющих определить величины ожидаемых перемещений, деформаций и напряжений в тонколистовых и тонкостенных элементах конструкций был посвящен ряд работ. Большинство исследований относится к изучению напряжений и деформаций от прямолинейных швов в тонких пластинках, продольных и кольцевых швов оболочек, точечных и шовных соединений.

Применительно к этим конструкциям и видам соединений разрабатывались и технологические способы снижения деформаций и напряжений.

M25680

В настоящей работе рассматриваются круговые сварные соединения, которые наиболее широко используются в тонкостенных конструкциях плоских элементов и оболочек и являются причиной больших перемещений и остаточных напряжений при сварке.

Вварка в тонкий лист (пластинку) фланцев, штуцеров, патрубков вызывает потерю устойчивости.

Сварка кругового шва в сферической оболочке приводит к значительным прогибам поверхности в зоне соединения, перекосам осей свариваемых круговых элементов, образованию эллипсности фланцев и т. п. Большие перемещения поверхности при сварке вызывают как технологические трудности изготовления изделий (сложная подгонка и сборка узлов), так и эксплуатационные.

Целью настоящей работы являлось:

1. Исследование закономерностей образования остаточных деформаций и напряжений при сварке круговых швов в элементах малых толщин: пластинках и сферических оболочках.

2. Разработка способов снижения остаточных деформаций и напряжений.

3. Исследование надежности предложенных технологических мероприятий путем оценки несущей способности конструктивных элементов.

Работа проводилась в лаборатории сварки МВТУ им. Н. Э. Баумана в контакте с рядом ОКБ и предприятий.

I. Остаточные напряжения при сварке круговых швов в пластинках

Образование деформаций потери устойчивости пластинки (листа), возникающих при сварке круговых швов, вызывает необходимость в исследовании полей остаточных напряжений.

Определение их позволяет разработать практические мероприятия по снижению остаточных деформаций изделия, которые зачастую представляют большие технологические трудности при сборке.

Имеющиеся в литературе решения (Г. Б. Талыпов) о плоско-напряженном состоянии круговых сварных соединений являются недостаточно точными ввиду:

1. Неучета влияния поперечной усадки.

2. Принятия завышенных значений продольной (окружной) усадки кругового шва ($\alpha T_к$), выбранной в качестве единственного возмущающего фактора, создающего сложное напряженное состояние.

3. Отсутствия конкретных данных по влиянию жесткости свариваемых элементов на деформации и напряжения и условий сборки свариваемых деталей (наличие прижимов и т. п.).

В данной работе приведено решение упруго-пластической задачи по определению остаточных напряжений в круговом сварном соединении на основе гипотезы одновременнности заварки шва по длине с учетом действия поперечной и продольной усадок шва.

Задача по расчету полей остаточных напряжений сводится к определению их при «сшивании» трех выделенных зон А, Б, В (рис. 1*а, б*),

где *А* — упруго-пластическая зона, состоящая из пластической и упругой областей,

Б — пластическая зона,

В — упругая зона.

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТА

Условия «сшивания» и непрерывности напряжений на границах для случая бесконечной пластинки записываются в виде следующей системы пяти уравнений:

$$\frac{r_2}{r_1}=\left(\frac{\operatorname{tg}\psi_{2Б}+\sqrt{3}\,m}{\operatorname{tg}\psi_{1Б}+\sqrt{3}\,m}\right)^{\frac{2m}{1+3m^2}}\left(\frac{\operatorname{tg}^2\psi_{2Б}+1}{\operatorname{tg}^2\psi_{1Б}+1}\right)^{\frac{(1-m)(1-3m)}{4(1+3m^2)}}\times$$

$$\times\left(\frac{\operatorname{tg}\psi_{1Б}-0{,}577}{\operatorname{tg}\psi_{2Б}-0{,}577}\right)^{1/2}\exp\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\,\frac{1-m^2}{1+3m^2}\,(\psi_{1Б}-\psi_{2Б})\right]; \qquad (1)$$

$$\frac{\sigma_{i\,1Б}}{\sigma_{i\,2Б}}=\left(\frac{\operatorname{tg}\psi_{2Б}+\sqrt{3}\,m}{\operatorname{tg}\psi_{1Б}+\sqrt{3}\,m}\right)^{\frac{m(1+3m)}{1+3m^2}}\left(\frac{\operatorname{tg}^2\psi_{2Б}+1}{\operatorname{tg}^2\psi_{1Б}+1}\right)^{\frac{1-m}{2(1+3m^2)}}\times$$

$$\times\frac{\cos\psi_{2Б}}{\cos\psi_{1Б}}\exp\left[\sqrt{3}\,\frac{m(1-m)}{1+3m^2}\,(\psi_{1Б}-\psi_{2Б})\right]; \qquad (2)$$

$$r_2\,\sigma_{i\,2Б}^{\frac{1}{m}}\sin\psi_{2Б}=E\,\sigma_T^{\frac{1-m}{m}}\left\{\Delta-\left|\frac{r_2}{E\,\sigma_T^{\frac{1-m}{m}}}\sin\psi_{2A}\left(\frac{\cos\psi_{2Б}}{\cos\psi_{2A}}\,\sigma_{i\,2Б}\right)^{\frac{1}{m}}\right|\right\}; \qquad (3)$$

$$\Delta=\Delta_п,\ \text{если}\ \Delta_п\geqslant\varepsilon_t r_2,\quad \Delta=\varepsilon_t r_2,\ \text{если}\ \Delta_п<\varepsilon_t r_2;$$

$$r_1\,\sigma_{i\,1Б}^{\frac{1}{m}}\sin\psi_{1Б}+E\,\sigma_T^{\frac{1-m}{m}}\,U_{r\,1Б}=\varepsilon_t r_1 E\,\sigma_T^{\frac{1-m}{m}}; \qquad (4)$$

$$\sigma_{i\,2Б}=\frac{\sigma_T}{2}\left(\frac{\operatorname{tg}\psi_{TA}+\sqrt{3}\,m}{\operatorname{tg}\psi_{2A}+\sqrt{3}\,m}\right)^{\frac{m(1+3m)}{1+3m^2}}\left(\frac{\operatorname{tg}^2\psi_{TA}+1}{\operatorname{tg}^2\psi_{2A}+1}\right)^{\frac{1-m}{2(1+3m^2)}}\times$$

$$\times\frac{1}{\cos\psi_{2Б}}\exp\left[\sqrt{3}\,\frac{m(1-m)}{1+3m^2}\,(\psi_{2A}-\psi_{TA})\right]. \qquad (5)$$

Неизвестными в уравнениях (1)—(5) являются $\sigma_{i\,1Б}$, $\sigma_{i\,2Б}$ — интенсивности напряжений на радиусах $r_1\simeq r_{1Б}$ и $r_2\simeq r_{2A}\simeq r_{2Б}$ соответствующих зон и $\psi_{1Б}$, $\psi_{2Б}$, ψ_{2A} — тригонометрические углы.

При этом

$$\sigma_{r1} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{i\,1Б}\cos\psi_{1Б},\quad \sigma_{t1} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{i\,1Б}\cos\left(\psi_{1Б} - \frac{\pi}{3}\right),$$

$$\sigma_{r2} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{i\,2Б}\cos\psi_{2Б},\quad \sigma_{t2} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{i\,2Б}\cos\left(\psi_{2Б} - \frac{\pi}{3}\right),$$

$$\sigma_{i\,2А} = \frac{\sigma_{i\,2Б}\cos\psi_{2Б}}{\cos\psi_{2А}},\quad \sigma_{r\,2А} = \sigma_{r\,2Б},$$

$$\sigma_{t\,2А} = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_{i\,2А}\cos\left(\psi_{2А} - \frac{\pi}{3}\right),\quad \psi_{ТА} = -\frac{\pi}{3}.$$

В уравнениях (1)—(5)

$U_{r\,1В}$ ($мм$) — радиальное перемещение зоны В на радиусе r_1,

m — коэффициент упрочнения материала; для ряда конструкционных материалов, с неявно выраженным пределом текучести, в работе приведена схема аппроксимации истинной деформационной кривой,

$\Delta_п$ ($мм$) — поперечная усадка шва; за величину ее принимается поперечное укорочение при сварке прямолинейного стыкового шва на пластинках (определяется экспериментально или расчетным путем в зависимости от удельной погонной энергии сварки),

ε_t — упругая составляющая деформации шва в окружном направлении в зоне Б; установлено, что в широком диапазоне диаметров круговых швов можно принимать

$\varepsilon_t = \varepsilon_т$ — деформацию, соответствующую пределу текучести материала $\sigma_т$,

$r_2 = r + b$ — радиус границы зон А и Б; при этом $2b$ — ширина зоны пластичности при нагреве, определяемая расчетом по методике Г. А. Николаева или экспериментально в зависимости от удельной погонной энергии сварки,

E ($кГ/мм^2$) — модуль упругости материала.

Система уравнений решается методом последовательных приближений.

В результате решения установлено, что максимальные остаточные напряжения находятся в зоне соединения и при

малых диаметрах круговых швов достигают предела текучести материала и в радиальном и в тангенциальном направлениях (рис. 2). Увеличение диаметра шва приводит к снижению радиальных напряжений растяжения.

Тангенциальные растягивающие напряжения в шве изменяются мало в зависимости от диаметра шва и близки к $\sigma_т$ материала.

В работе рассмотрено несколько практических случаев:
а) вварка жесткого фланца в бесконечную пластинку;
б) вварка жесткого фланца в пластинку конечных размеров;
в) вварка заплатки.

Установленные расчетные зависимости нашли удовлетворительное экспериментальное подтверждение. Измерения остаточных напряжений проводились для разных материалов и при различных диаметрах круговых швов (∅60, 80, 90, 300, 400).

На основании расчетных и экспериментальных данных установлено, что остаточные напряжения, возникающие при сварке, превышают критические напряжения, определяющие устойчивость пластинки (Mansfield, А. С. Вольмир).

II. Остаточные напряжения и деформации при сварке круговых швов на сферических оболочках

Основным видом деформаций при сварке круговых швов на сферических оболочках являются деформации местного изгиба поверхности в зоне сварки. В тонких оболочках толщиной до 12 *мм* из алюминиевых и магниевых сплавов прогибы в радиальном направлении в ряде случаев составляют 10—15 *мм*. Расчетное определение их связано с выявлением характера полей остаточных напряжений в зоне пластических деформаций и прилегающих областях.

В ряде случаев деформации изгиба можно устранить предварительной деформацией обратного знака. Поэтому расчетное определение их представляет практический интерес.

Имеющиеся в литературе аналитические решения дают большие отклонения от эксперимента. Задача определения остаточных деформаций, напряжений и перемещений состоит по существу из трех самостоятельных решений.

Определение остаточных напряжений и перемещений:

а) от действия поперечной усадки шва;
б) от действия продольной усадки шва;
в) общего решения от суммарного действия усадок.

При решении принимались те же допущения, что и для случая пластинок. На рис. 3 представлена расчетная схема задачи «в». Соединение разбивается на три зоны А, Б, В, которые «сшиваются» между собой с учетом реализации усадок кругового шва, а также непрерывности краевых напряжений ($\sigma_{r\,\Theta_1}$, $\sigma_{r\,\Theta_0}$), моментов ($M_{r\,\Theta_1}$, $M_{r\,\Theta_0}$) и углов поворота ($\vartheta_{r\,\Theta_1}$, $\vartheta_{r\,\Theta_0}$) на границах соединяемых зон.

Круговые соединения составляют диапазон диаметров швов с $2\Theta_1 \leqslant 25 \div 30°$. Это неравенство определяется изменением характера деформирования оболочки при сварке швов с $2\Theta_1 > 25°$, когда существенное влияние на остаточные перемещения оказывает эффект выпучивания кромок при сварке в направлении, обратном действию усадок. Швы с $2\Theta_1 > 30°$ следует отнести к кольцевым (В. М. Сагалевич).

Практический диапазон диаметров круговых швов в большинстве случаев включает краевое условие «сшивания», при которых в задаче «в» $\Delta = \Delta_п$. Здесь $\Delta_п$ — поперечная усадка шва.

Общее решение показало, что снижение максимальных радиальных напряжений в зоне шва $\sigma_{r\,A\,\Theta_1}$ примерно пропорционально $\operatorname{ctg}^2\Theta_1$, т. е. максимальные мембранные напряжения с увеличением диаметра шва очень интенсивно уменьшаются. Величина же момента $M_{r\,A\,\Theta_1}$ составляет незначительную величину.

В работе приведена зависимость, позволяющая принять упрощенную расчетную схему нагрузки оболочки A силой $P = \dfrac{\sigma_{r\,A\,\Theta_1}\,\delta}{\cos\Theta_1}$ на радиусе $a \sin\Theta_1$.

Аналитическое определение перемещений в зоне шва включает два этапа:

1. Определение краевого радиального напряжения $\sigma_{r\,A\,\Theta_1}$ (задача «в»).

2. Определение вертикальной составляющей перемещений (прогиба) оболочки A от краевой нагрузки $P = \dfrac{\sigma_{r\,A\,\Theta_1}\,\delta}{\cos\Theta_1}$.

Вертикальная составляющая перемещений (прогиб) s на основе теории оболочек (Gallety, З. Б. Канторович) после интегрирования и ряда упрощений вычисляется по формуле:

$$s = C_1' \frac{e^{k\omega}\sin(k\omega + \psi_1)}{\cos\omega} \frac{a}{\delta E}(1+\mu) - \frac{a}{\delta E}(T - \mu S)\sin\omega,$$

где a (*мм*) — радиус оболочки,
δ (*мм*) — толщина оболочки,
E ($кГ/мм^2$) — модуль упругости,
μ — коэффициент Пуассона,
ω (*рад.*) — текущий угол, $\omega = 90° - \Theta$,
T, S ($кГ/мм$) — тангенциальное и меридиональное усилия,

$$T \simeq C_1' k e^{k\omega} [\sin(k\omega + \psi_1) + \cos(k\omega + \psi_1)],$$

$$S = -C_1' e^{k\omega} \operatorname{ctg}\Theta \sin(k\omega + \psi_1),$$

$$k = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\frac{R}{\delta}},$$

C_1' — постоянная, определяемая из

$$C_1' = -\frac{\cos\alpha\sqrt{1+y^2}}{z} P, \qquad \text{где } \alpha = 90° - \Theta_1,$$

$$y = 1 + \frac{2}{\operatorname{ctg} k\alpha - 1},$$

$$z = -\frac{2e^{-k\alpha}}{\sin k\alpha} \cdot \frac{\operatorname{ch} 2k\alpha - 2\sin^2 k\alpha - 1}{\operatorname{ctg} k\alpha (1 - e^{-2k\alpha}) - (1 + e^{-2k\alpha})}.$$

Расчет прогибов на основе разработанной методики нашел удовлетворительное экспериментальное подтверждение при сварке круговых швов разных диаметров (∅ 78, 150, 220, 310) на оболочках из алюминиевых и магниевых сплавов.

Проверка расчетных зависимостей по определению остаточных перемещений и напряжений проводилась измерением (с помощью специальных приспособлений и инструмента) как на макетах, так и реальных конструкциях.

Максимальные отклонения экспериментальных значений величины s составляли не более 10—15%.

В работе приведены номограммы (типа рис. 4) по расчету величин перемещений (прогибов) в зависимости от радиуса, толщины оболочки и диаметра кругового шва.

В работе показана приемлемость разработанной схемы и метода расчета и к другому практическому случаю — определение перемещений и напряжений при сварке сферического сегмента с фланцем.

III. Разработка и исследование методов снижения остаточных деформаций и напряжений при сварке круговых швов

В практике изготовления тонколистовых и тонкостенных элементов сварных конструкций находят широкое применение как общие, так и специальные методы устранения остаточных деформаций от сварки.

Применительно к круговым сварным швам основным технологическим мероприятием является ручная правка.

Некоторое распространение (для крупногабаритных оболочек) нашел метод активного растяжения зоны шва, а также метод предварительного охлаждения (США) свариваемого кругового элемента.

Использование их при изготовлении тонколистовых и оболочковых конструкций далеко не всегда является эффективным как с точки зрения обеспечения требуемых проектных допусков, так и трудоемкости устранения деформаций от сварки.

В данной работе разработаны два метода снижения остаточных деформаций и напряжений и установлены расчетные зависимости по определению необходимых параметров их технологического осуществления.

Анализ напряженного состояния (I, II), возникающего в соединении, показал, что на пластинку (оболочку) в зоне шва действуют растягивающие радиальные напряжения, направленные к центру фланца (штуцера). Принципиальное решение по снижению остаточных напряжений и деформаций основывается на компенсации упругой радиальной составляющей перемещения за счет пластической деформации либо пластинки (оболочки), либо свариваемого фланца.

Применительно к пластинкам был разработан метод предварительной выштамповки и послесварочной осадки зоны кругового шва (рис. 5). Согласно этому методу зона отверстия под сварку выштамповывается на ширине B на высоту h. Параметры выштамповки — B и h — определяются по методике, приведенной в диссертации, основанной на использовании положений теории конических оболочек. В качестве расчетных нагрузок принимаются величины максимальных радиальных напряжений, определяемые из зависимостей, установленных при расчете полей остаточных напряжений (п. 1).

В работе приведены номограммы для ряда толщин по определению параметров B и h на разных диаметрах круго-

вых швов, применительно к малоуглеродистым сталям и алюминиевому сплаву АМг6. При этом из технологических соображений принимается соотношение $\frac{h}{B} \leqslant \frac{1}{8}$, установленное на основании экспериментов. При расчетах параметров B и h определяется допуск на эти величины в соответствии с критериями потери устойчивости пластинки.

Экспериментальным путем были подтверждены определенные расчетом параметры B и h, при которых потеря устойчивости пластинок полностью устранялась, а остаточные напряжения в радиальном направлении становились меньше критических.

Рассмотренный метод приемлем в диапазоне диаметров кругового шва до 150—200 *мм* для толщин до 6 *мм* и осуществляется с помощью стандартного или специального оборудования и оснастки.

Устранение прогибов на сферической оболочке осуществляется применением первой операции — предварительной пластической выштамповкой зоны отверстия на базе B с краевым выгибом h. Экспериментально было установлено, что ширину B следует принимать в пределах

$$l \geqslant B \geqslant \frac{3}{4} l, \qquad l = 2\sqrt{R\delta},$$

где l — расстояние от края, на котором происходит затухание деформаций и напряжений от нагрузки (В. В. Новожилов).

За h принимается s — величина краевой вертикальной составляющей перемещений, рассчитываемой по методике определения прогибов при сварке (п. II).

С помощью этого технологического приема устраняются перемещения поверхности, а поле остаточных напряжений в зоне шва имеет тот же характер распределения, что и при сварке без предварительной деформации.

Профиль оболочки после выштамповки и сварки близок к определенному теоретически.

Эксперименты, проведенные на оболочках из алюминиевых и магниевых (∅78, 150, 220) сплавов подтвердили эффективность метода выштамповки и хорошую сходимость с расчетными данными.

Применение метода выштамповки возможно, когда расстояние от шва до других соединений или края оболочки

(пластинки) не меньше $^3/_4 l$, что является в ряде случаев ограничением.

Более широкими возможностями обладает второй метод, предусматривающий осадку компенсационного кольца фланца.

На рис. 6 показана обычная конструкция стыка фланца под сварку с пластинкой (оболочкой) и фланец с компенсационным кольцом. Осадка этого кольца обеспечивает деформацию металла в радиальном направлении и компенсацию упругой составляющей радиального перемещения от сварки.

Геометрические параметры кольца: b — ширина, h — высота, $d_к$ — средний диаметр.

Экспериментально установлено, что ширину b следует выбирать в пределах 3—5 *мм*, а высоту $h = \delta + (1 \div 2)$ *мм*. При этом $d_к = d_ф + (16 \div 24)$ *мм*.

Расчет усилия осадки проводился на основе метода осредненных значений (Е. П. Унксов, С. И. Губкин и др.):

$$P = \sigma_т \pi \left[d_к b + \frac{b^2 \nu}{h} \left(d_к - \frac{1}{3} b \right) + \frac{2}{3} \frac{b^3 \nu}{h^2} (d_к - b) \right],$$

где $\sigma_т$ ($кГ/мм^2$) — предел текучести материала,

ν — коэффициент трения между пуансоном и компенсационным кольцом.

Применение данного метода позволяет полностью устранить деформации потери устойчивости на пластинках и перемещения (прогиб) поверхности оболочек. Одновременно уменьшаются радиальные напряжения растяжения. Тангенциальные напряжения в зоне шва не изменяются.

Метод эффективен и в случае несимметричных полей деформаций, приемлем для любых диаметров круговых швов и не ограничивается конструктивными особенностями изделия. Для осуществления его применялся простой плоский штамповый инструмент и стандартное прессовое оборудование с усилием $P = 250 \div 300$ *т*. Так, осадка кольца усилием $P = 150$ *т* при диаметре шва $d_ш = 310$ *мм*, вваренного в оболочку $R = 920$ *мм*, $\delta = 2$ *мм*, обеспечила устранение деформаций по всем направлениям.

IV. Прочность круговых сварных соединений

Известно, что наличие круговых сварных соединений в резервуарах и сосудах давления в целом ряде случаев является причиной снижения несущей способности изделия.

В зоне круговых швов возникают трещины как при испытаниях конструкции под нагрузкой, так, иногда, и в результате длительного вылеживания изделия (титановые сплавы).

С целью изучения причин разрушения были проведены эксперименты по установлению характера изменения пластических деформаций, а также остаточных напряжений (I, II) в зоне круговых швов.

Разрушение соединения под нагрузкой возникает в подавляющем большинстве случаев в тангенциальном направлении в зоне заварки шва с внешней стороны его и начинается с внутренней поверхности.

Экспериментальным и расчетным путем было установлено, что с наружной стороны шва на внутренней поверхности оболочки имеют место пик остаточных радиальных пластических деформаций (ε_r^P) растяжения и высокие растягивающие радиальные напряжения (σ_r).

Повторный переплав в месте заварки шва вызывает дополнительную пластическую деформацию растяжения в радиальном направлении. Эксперименты показали, что такое напряженное состояние характерно для любых диаметров круговых швов.

Таким образом, выполнение круговых швов вызывает возникновение сложного напряженного состояния и создает конструктивный концентратор в соединении, что в сочетании с технологическими дефектами сварки и сборки (поры, непровары, замок, депланация и др.) — технологическим концентратором — является причиной снижения несущей способности изделия.

Оценка влияния рассмотренных методов устранения сварочных деформаций и снижения напряжений производилась экспериментальным путем при испытании на прочность в условиях двухосного растяжения сферических элементов с вваренными в них фланцами.

Сравнение результатов испытаний при статической и малоцикловой нагрузках (на машине УДР-2) позволило сделать вывод, что применение рассмотренных методов не снижает несущей способности круговых сварных соединений по сравнению с выполненными по обычной технологии. Это относится как к методу выштамповки, осуществляемой на сферической оболочке, так и к методу осадки компенсационного кольца фланца. В последнем случае следует отметить бо́льшую стабильность показаний циклических испытаний (n), предшествующих разрушению. Снижение остаточных на-

пряжений обеспечивает повышение надежности конструктивного элемента под нагрузкой.

Экспериментально установлено, что оптимальным сечением компенсационного кольца следует считать полуокружность (рис. 6), плавно сопрягаемую с поверхностью буртика. При этом исключаются концентраторы напряжений в местах сопряжения, а усилие осадки (п. III) снижается вследствие малой площади пятна контакта в первоначальный момент.

Выводы

1. Расчетным и экспериментальным путем установлено, что остаточные напряжения, деформации и перемещения, возникающие при сварке круговых швов в конструктивных элементах малых толщин — пластинках и оболочках — определяются совместным действием поперечной и продольной усадок шва.

В расчетах рекомендуется использование принципа одновременной укладки шва по длине.

2. Показано, что после сварки круговых швов в пластинках возникают высокие сжимающие тангенциальные напряжения, приводящие к потере устойчивости конструктивного элемента. Полученные расчетные зависимости позволяют определять остаточные напряжения в функции геометрических параметров и вида материала пластинок, диаметра кругового шва, режима сварки.

3. При сварке круговых швов в оболочках возникают радиальные перемещения в виде прогиба, который носит локальный характер. Полученные расчетные зависимости позволяют определять остаточные перемещения в функции геометрических параметров и вида материала оболочки, диаметра шва и режима сварки.

4. Разработан метод устранения остаточных перемещений при сварке круговых швов в пластинках, сочетающий предварительную пластическую деформацию зоны вокруг отверстия с послесварочной осадкой выштампованной зоны в плоскость. Расчетные зависимости позволяют определить параметры выштамповки зоны на основе учета величин остаточных напряжений, возникающих в соединении.

5. Показана рациональность применения метода предварительной выштамповки зоны кругового отверстия в сферических оболочках с целью устранения остаточных перемещений, возникающих в соединении. Расчетные зависимости по

выбору параметров предварительной выштамповки основаны на приведенном расчетном методе по определению остаточных напряжений и перемещений от кругового шва в оболочке.

6. Разработан метод осадки компенсационного кольца фланца, позволяющий полностью устранить деформации и снизить остаточные напряжения, возникающие от круговых швов в пластинках и оболочках.

Предложенные методы позволяют решить проблему устранения остаточных деформаций при выполнении круговых сварных соединений в конструктивных элементах малых толщин.

7. Экспериментальным путем при статической и малоцикловой нагрузке в условиях двухосного растяжения установлено, что осуществление предлагаемых методов по ликвидации деформаций и уменьшению напряжений не снижает несущей способности изделия. Применение метода осадки компенсационного кольца фланца стабилизирует величину конструктивной прочности.

* *

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Вершинский А. В., Сагалевич В. М., Деформации при сварке круговых швов. Труды V конференции сварщиков Западного Урала, Пермь, 1966.

2. Сагалевич В. М., Вершинский А. В., Остаточные напряжения и деформации при сварке стыковых круговых швов на тонких пластинах. Тезисы докладов XI Московской городской научно-технической конференции, 1966.

3. Сагалевич В. М., Вершинский А. В., Деформации и напряжения при сварке круговых швов пластин и оболочек, «Сварочное производство», № 2, 1967.

4. Сагалевич В. М., Вершинский А. В., Метод устранения деформаций при сварке круговых швов, сб. «Надежность сварных соединений и конструкций», Машиностроение, 1967.

5. Вершинский А. В., Сагалевич В. М., Остаточные напряжения от круговых швов в пластинке, «Известия вузов. Машиностроение», № 6, 1968.

Л-79357 от 21/III—68 г. Тип. МВТУ. Объем 1 п. л. Зак. 340. Тир. 150

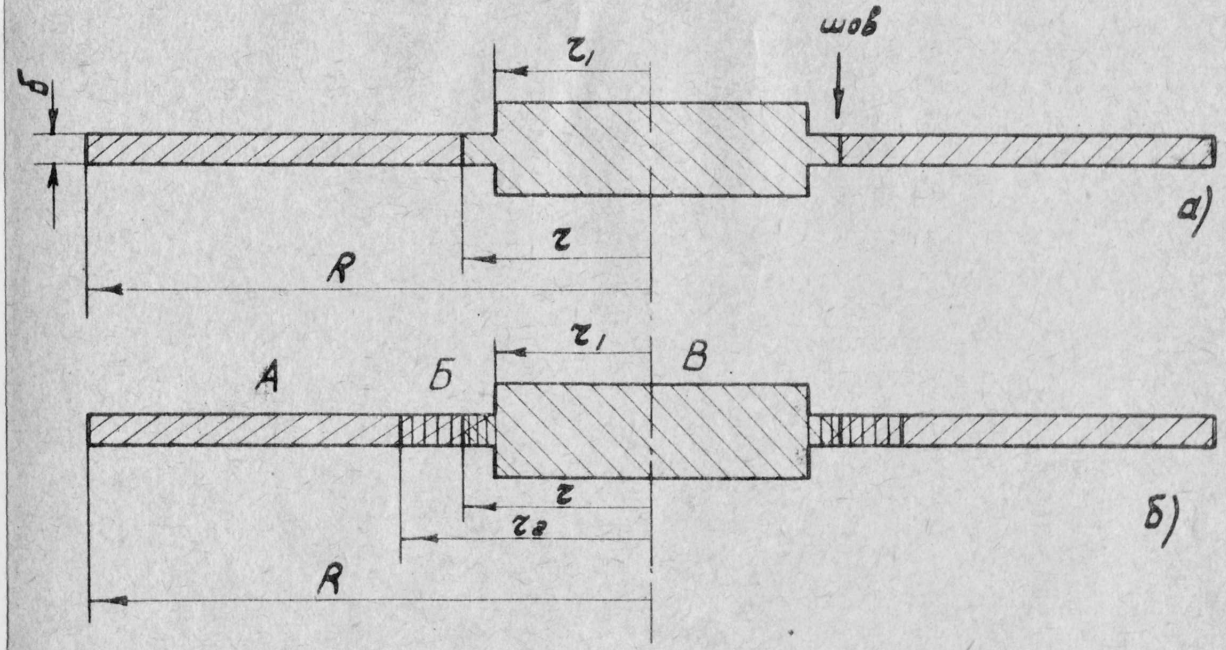


Рис. 1. Расчетная схема определения остаточных напряжений от кругового шва в пластинке.

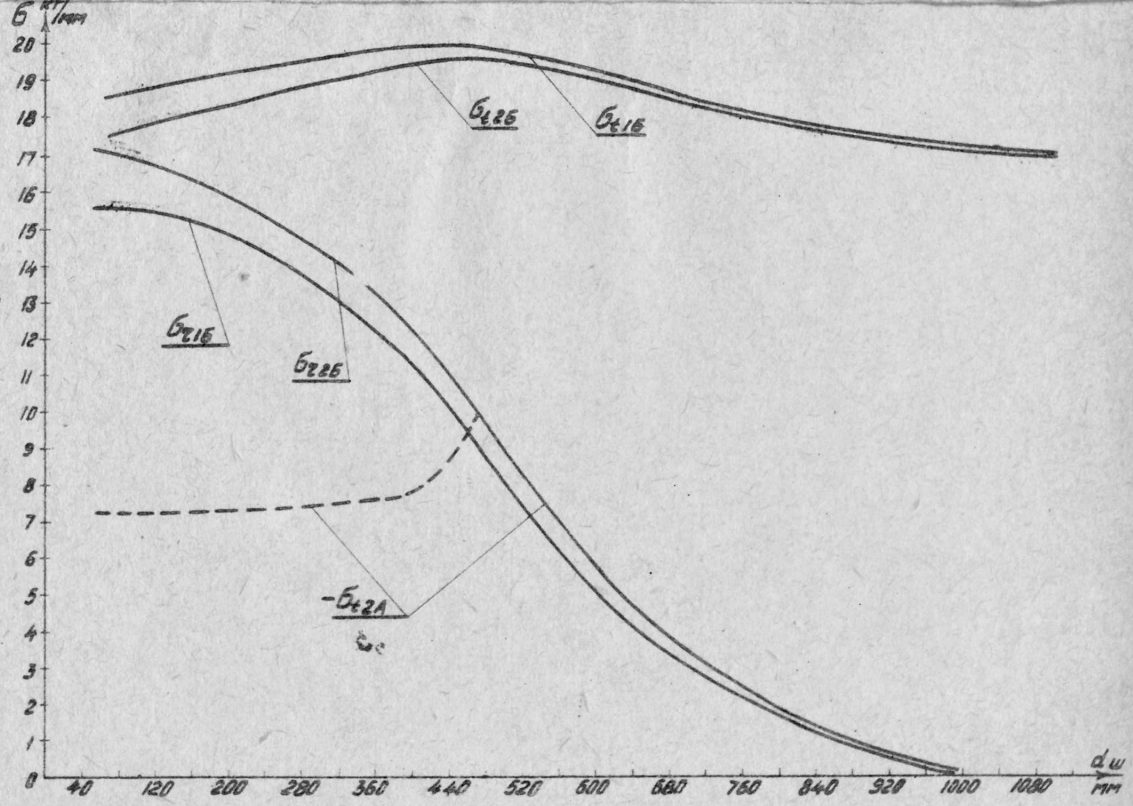


Рис.2. Зависимость остаточных напряжений в пластинке от диаметра кругового шва (АМг-6).

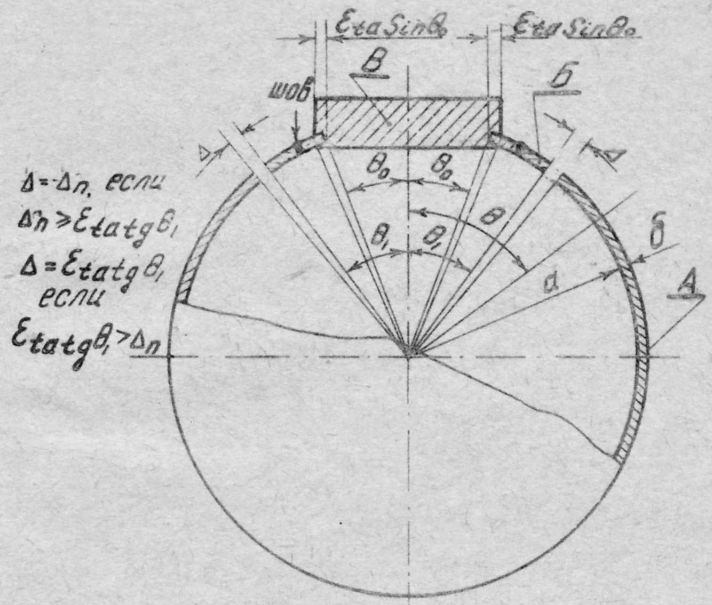


Рис. 3. Расчетная схема определения деформаций и напряжений от кругового шва в сферической оболочке.

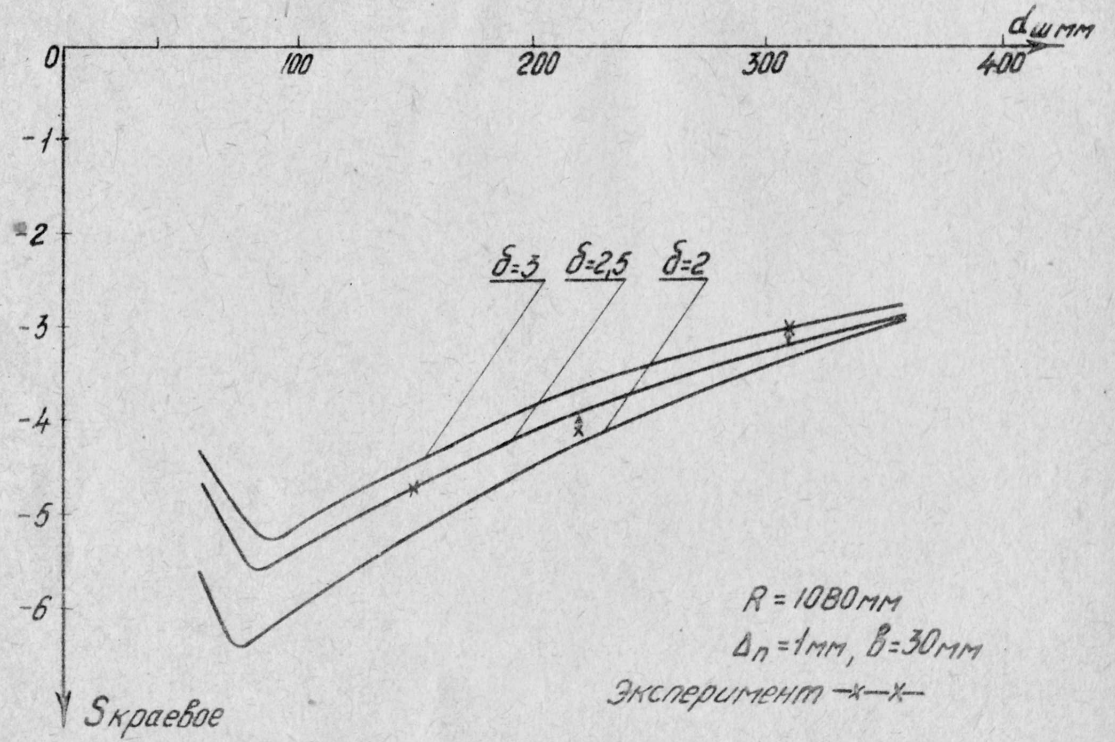


Рис 4 Величина максимальных прогибов оболочки в зависимости от толщины (АМг6).

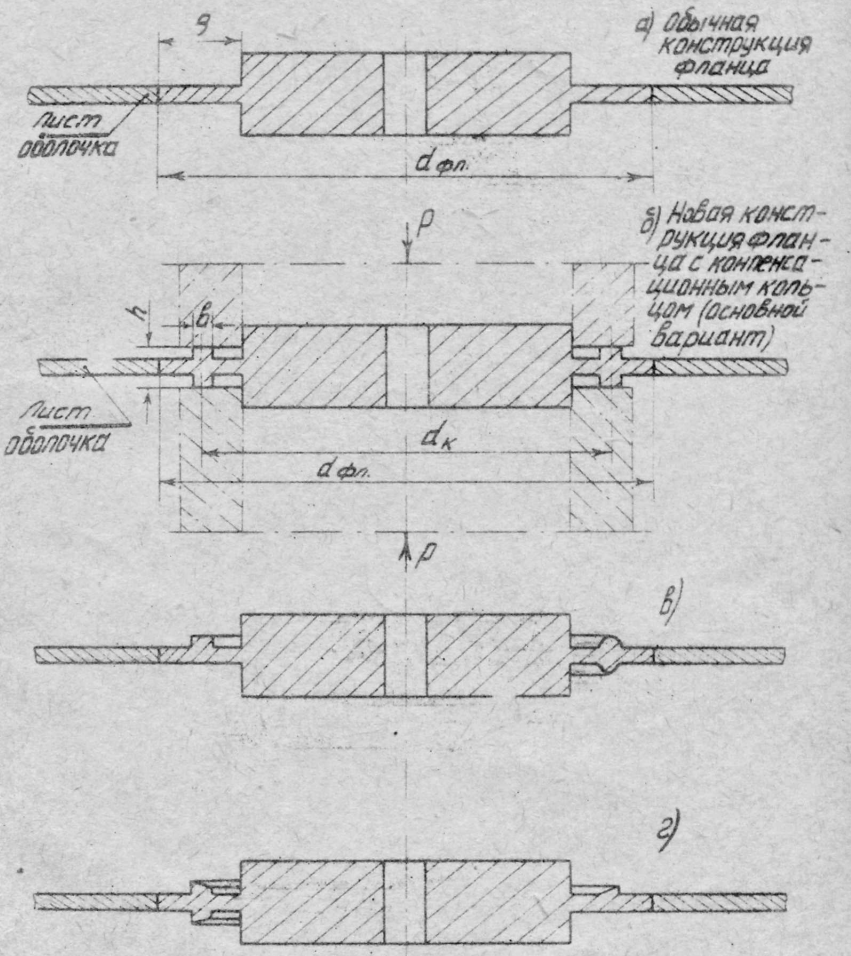


Рис. 6. Метод осадки компенсационного кольца.