

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДВУХСТЕНЧАТОЙ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА

Академик НАН Украины Л. М. ЛОБАНОВ, В. С. ВОЛКОВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены конструкции преобразуемого объема (КПО) конического типа, являющиеся уникальной разработкой ИЭС им. Е. О. Патона и не имеющие аналогов за рубежом. Предложены технические решения, позволяющие повысить надежность оболочечных КПО, а также технологические подходы к их реализации. Представлено краткое описание технологии изготовления неразъемных тонколистовых соединений из аустенитной нержавеющей стали, способных обеспечить герметичность деформируемых оболочек.

Ключевые слова: конструкции преобразуемого объема, несущие оболочки, двухстенчатые трансформируемые оболочки

При разработке оболочечных конструкций одной из наиболее актуальных проблем является обеспечение их эксплуатационных характеристик — герметичности и долговечности, прочности и коррозионной стойкости сварных соединений. В конструкциях преобразуемого объема (КПО), разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона, надежность швов и материала оболочки особенно важны, поскольку в процессе трансформации они подвергаются значительным изгибам, достигающим 150° в вершинах технологических гофров [1]. Перспективные области применения КПО в качестве резервуаров для хранения сыпучих и жидких веществ, в том числе веществ с повышенной химической активностью, требуют поиска эффективных способов повышения надежности оболочки. Наиболее рациональным решением можно считать создание двухслойной конструкции, в которой дублирование наружной стенки с разделением ее ограждающей и несущей функций способно предотвратить последствия возможной разгерметизации.

В большинстве случаев предпочтительной является технология изготовления КПО путем формирования гофрированных дисков из тонкостенных конических заготовок, позволяющая создавать конструкции широкого диапазона типоразмеров и параметров. Изометрическое преобразование замкнутой оболочки в виде усеченного кругового конуса может быть реализовано расчленением ее поверхности семейством плоскостей, нормальных к оси конуса, и последовательным зеркальным отражением частей поверхности относительно соответствующих плоскостей $\gamma_n, \gamma_{n+1}, \dots, \gamma_k$ (рис. 1). При пересечении преобразованной

Q_{n+1} и непреобразованной части поверхности Q_n образуется ребро в области пересечения, которое лежит в плоскости γ_n и перемещается вместе с ней в процессе преобразования. Сущность разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона способа заключается в последовательном, близком к изометрическому, изгибании гладкой конической заготовки и формировании гофрированного диска локальным воздействием формирующего инструмента на вращающуюся оболочку [2]. Изгибаемый кольцевой участок заготовки охватывает рабочую поверхность инструмента, перемещается с наружной части его боковой поверхности на внутреннюю и принимает положение, зеркальное первоначальному, формируя внутреннюю стенку кольцевого гофра. Наружная стенка гофра формируется недеформируемым участком оболочки, который перемещается вдоль оси ее вращения. В ходе формообразования каждого последующего гофра глубиной k высота конической оболочки

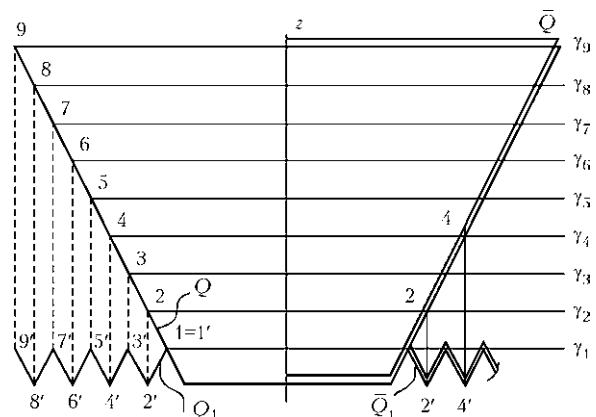


Рис. 1. Схема изометрического преобразования замкнутых конических оболочек: $\gamma_1 \dots \gamma_9$ — параллельные секущие плоскости; $1 \dots 9$ — точки пересечения следов секущих плоскостей с боковой образующей конической поверхности; $1' \dots 9'$ — точки отраженной части поверхности, соответствующие точкам $1 \dots 9$; Q, Q_1 и Q, Q_1 — соответственно непреобразованная и преобразованная части поверхности кругового конуса



Толщина ленты, мм	Сварочный ток, А	Сварочное напряжение, В	Скорость сварки, см/с	Защитная среда	Результаты		
					ширина шва, мм	провар	депланация, мм
0,15	3,5	10	0,14	Гелий	1,35...1,4	Полный	0,45...0,5
0,15	5	10	0,28		1,2...1,3		0,5...0,6
0,15	7	10	0,42		1,4...1,5		0,3...0,35
0,15	8,5	10	0,55		1,3...1,4		0,2...0,3

уменьшается на значение, равное $2k$. Совместное формирование двух конических оболочек Q и \bar{Q} в ходе одного технологического процесса позволяет получать топологически эквивалентные гофрированные поверхности Q_1 , \bar{Q}_1 , совместимые движением вдоль оси симметрии.

Экспериментально определены оптимальные режимы формирования двухслойных гофрированных дисков изгибанием оболочек из стали марки 12X18H10T с наружным диаметром $D = 150$ мм и толщиной стенки 0,15 мм; одна из конических оболочек плотно вставляется в другую, после чего обе заготовки закрепляются в центрирующем коническом отверстии формы-матрицы. При оптимальных технологических параметрах процесса полученные диски лишены дефектов поверхности и имеют плотное прилегание между слоями оболочек при отсутствии тенденции к их последующему разделению: диапазон скоростей вращения заготовок при ротационном выдавливании на матрице находится в пределах 50...250 об/мин, скорость поступательной подачи формирующего инструмента — от 0,3 до 2,0 мм/об.

Предполагаемые области использования конических КПО требуют особой тщательности в отработке задач надежности и долговечности тонких оболочек, сборка которых подразумевает наличие прецизионных сварных швов большой протяженности. Определенные трудности возникают при последующей сварке двухслойных оболочек по кольцевым контурам. Несмотря на плотное примыкание кромок оболочек при сборке, под действием сварочного нагрева происходит увеличение зазора между слоями, что может привести к их несплавлению. Анализ существующих способов сварки и оценка их технологичности показывают, что:

- при сварке внахлестку роликовой машиной соединения в два раза толще основного металла. Шов имеет низкие пластические свойства, его исполнение требует сложных приспособлений, причем на швах большой протяженности ролики подгорают, что приводит к увеличению контактного сопротивления и снижению качества сварного соединения;

- при микроплазменной сварке плавлением получают соединения стабильно высокого качества, не требуется сложного оборудования и приспособлений.

При выполнении данного способа при сварке листов образуется ванна расплавленного металла объемом 0,12...0,17 мм³. Малейшие возмущения приводят к ее разрыву, т. е. к прожиганию; избежать этого можно благодаря точному соблюдению условий сборки и сварки; исследованные параметры режимов сварки приведены в таблице. Исходя из результатов исследования, можно выбрать режим применительно к конкретным условиям;

- сварка лазерным лучом требует сложного и дорогостоящего оборудования и прецизионной сборки свариваемых участков оболочек, что сопряжено со значительными трудностями; кроме того, вызывает сложности обеспечение защиты расплавленной зоны и зоны охлаждающегося шва. Тем не менее, данный способ позволяет получить высокое качество швов при их минимальной ширине, что важно для качественного формирования гофрированных дисков из свариваемых оболочек. При сварке волоконным лазером с мощностью лазерного пучка $P = 65$ Вт заготовок из стальной ленты марки 12X18H10T, аналогичным образцам из таблицы, со скоростью $v_{св} = 2$ см/с, ширина шва составила $w_{ш} = 0,6...0,7$ мм при полном проваре и депланации в пределах 0,15...0,25 мм (защитные среды: гелий сверху и аргон снизу шва) [3].

Продолжительность сварки стыковых соединений при изготовлении КПО конического типа и высокая относительная доля промежуточных сборочных операций при прочих равных условиях не позволяют считать скорость процесса сварки решающим фактором, определяющим преимущество одного из рассматриваемых методов. В условиях затрудненного доступа к корню шва и сложности совмещения стыка при сборке двух оболочек на силовых элементах в большинстве случаев предпочтителен способ микроплазменной сварки. Сварку лазерным лучом можно считать оптимальной на стадии изготовления исходных конических заготовок гофрированных дисков, требующих минимальных искажений поверхности при выполнении линейных швов малой ширины с малыми удельными тепловложениями.

При механических испытаниях исследуемых образцов моделировался характер деформаций каждого типа швов, используемых в линейных и кольцевых соединениях КПО. Для проверки характеристик прочности и пластичности соедине-

ний, полученных способом микроплазменной сварки, из каждого сварного шва изготавливали по три стандартных образца для испытаний на растяжение и изгиб. Результаты испытаний показали, что ни один из образцов не разрушился по сварному соединению; разрыв проходил по основному металлу под углом к оси образца. Диаграмма растяжения образцов стандартная, с выраженной площадкой текучести, характерной для используемой марки стали. Полученные характеристики (сталь 12X18H10T) в зависимости от толщины имеют следующий вид:

для $h = 0,15$ мм:

$$\sigma_T = 320...330 \text{ МПа}; \sigma_B = 68...71 \text{ МПа}; \\ \delta = 40...42 \%; \psi = 50...52 \%;$$

для $h = 0,1$ мм:

$$\sigma_T = 350...370 \text{ МПа}; \sigma_B = 70...72 \text{ МПа}; \\ \delta = 39...41 \%; \psi = 48...51 \%;$$

Все образцы испытывали на изгиб до угла 180° на оправке с радиусом, равным двум толщинам основного металла, при этом разрушений и трещин замечено не было. Для усложнения условий испытаний применяли метод сплющивания, при котором изгиб прямоугольного образца проводили до соприкосновения его противоположных кромок; в этом случае была заметна незначительная пластическая деформация на поверхности швов без признаков разрушения сварного соединения. Таким образом, прочность и пластичность полученных сварных соединений не уступают аналогичным характеристикам основного металла и позволяют осуществлять предусмотренное технологией формоизменение преобразуемых оболочек без нарушения их герметичности.

Испытания на прочность образцов стыковых соединений ленты 12X18H10T, полученных сваркой лазерным лучом, проводили на испытательной системе MTS 318.25 на приспособлении, представляющем собой сегмент ротационного

формирующего оборудования (матрицы) в области формирования гофра с максимальным диаметром и пуансона с формой рабочего торца, соответствующей профилю формирующего ролика для данной толщины материала (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена диаграмма деформации, полученная при обратном изгибе образца толщиной 0,15 мм по оси, перпендикулярной к линии сварного шва. При повторной деформации каждого из трех испытываемых образцов кривые зависимости $P(l)$ характеризуются смещением точки P_{\max} в сторону начальных значений осевых перемещений. После трех полных циклов изгиба на угол 180° все образцы исследовали капиллярными методами контроля с использованием пенетранта MR[®] 68 и проявителя MR[®] 70 производства MR[®] Chemie GmbH, при этом раскрытия дефектов и трещин обнаружено не было.

Герметизацию сформированных гофрированных дисков производили путем их сварки с плоскими доньшками из стали 12X18H10T по торцу малого кольцевого контура на профильной оправке, обеспечивающей плотность прилегания кромок совмещенных участков конических поверхностей заготовок и отвод тепла при сварке кольцевого шва (рис. 3, а). Обработку технологии проводили на оболочках с большим диаметром $D = 140$ мм, меньшим диаметром $d = 90$ мм, толщиной 0,15 мм в сборе с доньшками расчетной толщиной 0,3 мм, сварку вели без присадочного материала в автоматическом режиме с помощью микроплазменной горелки с системой позиционирования по оси шва и с контролем качества сварного соединения. Сварочный режим: $I_{\text{св}} = 3,5$ А, $U = 10$ В, $v_{\text{св}} = 0,33$ см/с.

Скорость сварки микроплазменной горелкой при соединении дисков задавали вращением конструкции на специальном стенде. Качество сварного соединения контролировали визуально, также во внутренней полости оболочки создавали избыточное давление $P = (0,2...0,3) \cdot 10^{-2}$ МПа с

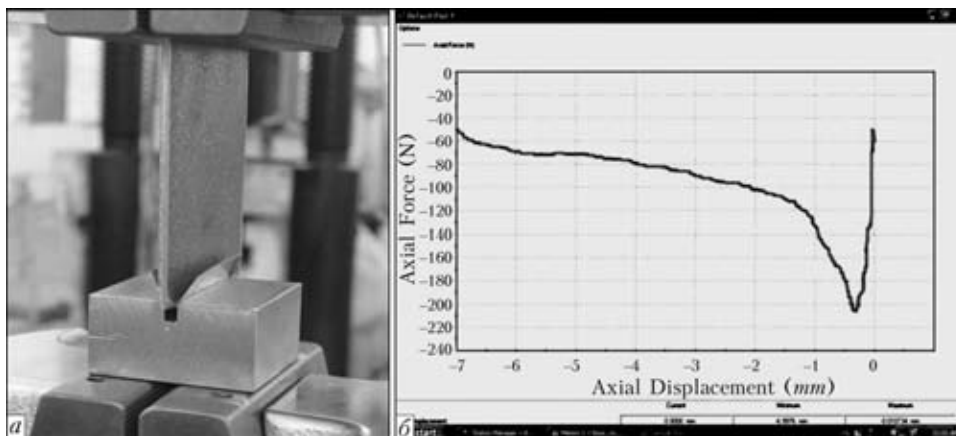


Рис. 2. Сегмент формирующей матрицы для испытаний фрагмента сварного шва на изгиб (а) и диаграмма деформации образца толщиной 0,15 мм (б); по оси ординат — формирующее усилие $P_{\max} = 230$ Н; по оси абсцисс — осевые перемещения, l , мм

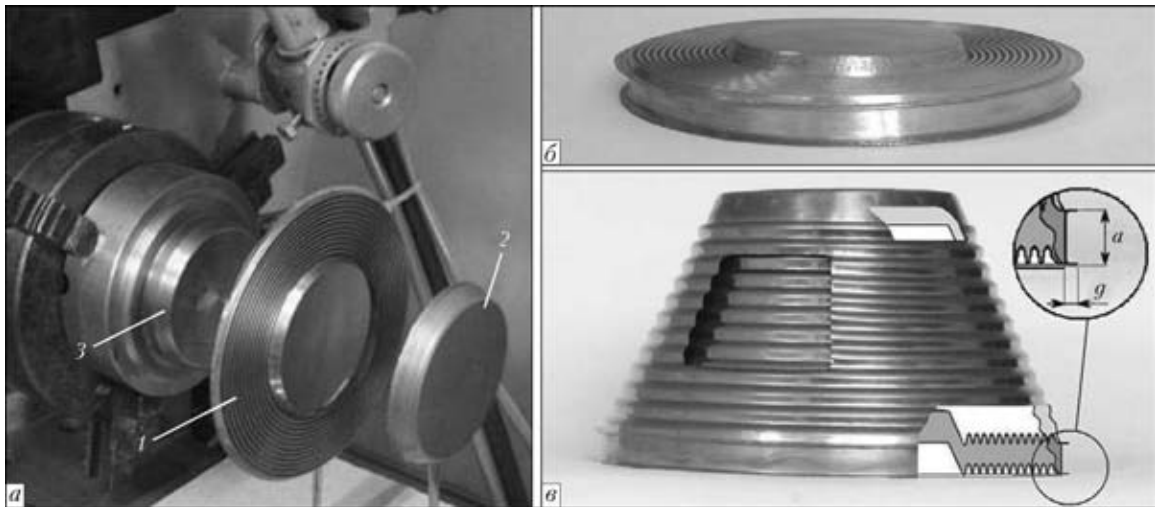


Рис. 3. Сборка исходных гофрированных дисков двухстенчатой конической оболочки (а) (1 — гофрированный диск; 2 — герметизирующее доньшко; 3 — профильная оправка), двухстенчатая КПО с радиусами оснований $R = 70$ мм, $r = 49$ мм и углом конусности $\alpha = 25^\circ$ в компактном (сложенном) состоянии (б) и та же конструкция в раскрытом состоянии (в); на разрезе справа показаны начальная и конечная фазы преобразования; a — высота шпангоута; g — ширина горизонтальных полок шпангоута

последующим контролем его падения в течение 60 мин.

При сборке гофрированных дисков на кольцевых несущих элементах (шпангоутах) требуется соблюдение соотношений их взаимных геометрических параметров на всех стадиях преобразования, которые обеспечивают свободное движение внутренней оболочки со сжатием воздуха в межстеночном пространстве (кессоне) до определенного давления, позволяющего в свою очередь произвести полное преобразование наружной оболочки к расчетным размерам. Ширина g горизонтальных полок шпангоута П-образной конфигурации (рис. 3, в) определяется технологией сварки по торцевым отгибам кольцевых контуров двух оболочек и находится в пределах $g = 40 \dots 50\Delta$, где Δ — толщина конструкционного материала оболочек; толщина стенки шпангоута рассчитывается с учетом действующих на конструкцию технологических и эксплуатационных нагрузок. Высота шпангоута a должна обеспечить возможность одновременного движения оболочек без касания любых точек их поверхностей.

Процесс раскрытия оболочек начинается с гофра максимального диаметра. Полученное экспериментальным путем значение избыточного давления, необходимое для полного раскрытия одинарной оболочки исследуемой конструкции, составляет 10^5 Па [4] и приблизительно соответствует значению нормального атмосферного давления. Таким образом, необходимым условием полного раскрытия наружной оболочки является двукратное увеличение исходного давления воздуха P_1 в межстеночном кессоне при сближении оболочек на всех стадиях преобразования $P_2 = 2P_1$, следовательно, при изотермическом сжатии воздуха $V_2 = V_1/2$, где V_1, V_2 — объемы кессона в началь-

ный момент раскрытия гофра внутренней оболочки и в начальный момент раскрытия соответствующего ему наружного гофра. Однако, как следует из условия сохранения изометричности S_1 и S_2 , на окончательной стадии трансформации объемы V_1, V_2 и соответственно давления P_1 и P_2 равны, что означает невозможность полного раскрытия последнего гофра n_i с минимальным диаметром. Кроме того, требуемое соотношение $P_2 = 2P_1$ при формировании гофра n_1 с максимальным диаметром соответствует условию $l = a/2$, а для последующих гофров параметр l растет из-за изменения соотношения объемов преобразованного и непреобразованного участков межстеночного кессона, что может привести к механическому соприкосновению оболочек в области минимальных диаметров гофров, локальной потере устойчивости и искажению их поверхностей. Поэтому высота шпангоута a выбирается исходя из условия $a \geq k$, где k — глубина формирования гофра; максимальные значения a ограничены требованиями компактности конструкции и, следовательно, увеличения коэффициента ее трансформации.

На рис. 4, б представлена схема преобразования последнего гофра оболочек, имеющего минимальный диаметр. Межстеночное пространство V разделено на три условных объема, соотношения между которыми непрерывно изменяются в процессе раскрытия конструкции: V_K — ограниченное герметизирующими доньшками; V'_S и V_S — ограниченных соответственно преобразованными и непреобразованными участками боковых гофрированных поверхностей. При $l \approx a$ давление раскрытия гофра $n_i P_2 = P_1 V_1 / V_2$ и $V_1 / V_2 = 2$. Дальнейший процесс раскрытия наружного гофра с минимальным диаметром возможен лишь в том случае, если глубина k соответствующего ему

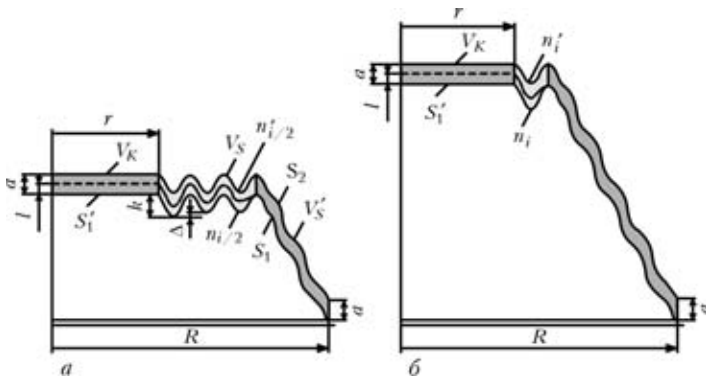


Рис. 4. Схема преобразования гофров двухстенчатой КПО со средним $n_{i/2}$ (а) и минимальным n_i (б) диаметрами

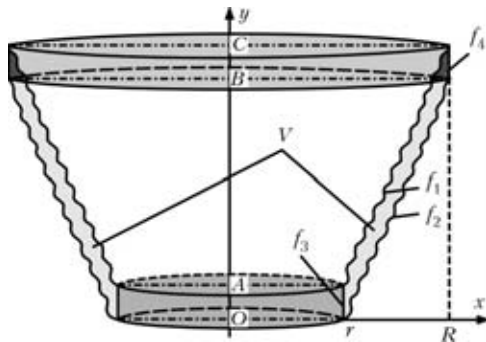


Рис. 5. Схема двухстенчатой КПО

внутреннего гофра принудительно увеличена на стадии формирования на $\tilde{\Delta} \leq a/2$. Очевидно, что после раскрытия гофра $n_{i/2}$ (рис. 4, а) преобразование недеформированной поверхности оболочки избыточным давлением возможно благодаря сжатию технологического кессона с объемом V_K , удовлетворяющим условию

$$V_K \geq V'_S \quad (1)$$

Следовательно, критерием полного раскрытия конструкции является соответствие этому же условию соотношения r/R при соблюдении изометричности оболочек на всех стадиях преобразования.

На рис. 5 представлена схема двухстенчатой КПО для определения соотношений условных объемов межстеночного пространства (V_1, V_2, V_3, V_4) исследуемой КПО, образованных вращением вокруг оси ординат профилей образующих f_1, f_2, f_3, f_4 . Объем межстеночного кессона V может быть выражен как $V_2 + V_4 - V_3 - V_1$, или с учетом равенства внутренних объемов преобразуемых оболочек $V = V_4 - V_3$. Конгруэнтность образующих исходных гофрированных оболочек в любом осевом сечении конструкции при расчетах объемов межстеночного кессона позволяет аппроксимировать их выражениями для цилиндрической поверхности.

Учитывая, что $OA = BC = a$, можно записать: $V = \pi a(R^2 - r^2)$. Так как условие (1) соответствует соотношению $\pi r^2 a \geq \pi a(R^2 - r^2)$, необходимое для полного раскрытия соотношение диаметров двухстенчатой КПО запишется как

$$r \geq \frac{R}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

При объединении двухстенчатых КПО конического типа в единую структуру по соответствующим основаниям радиуса r и R может быть получена многоконусная КПО периодического профиля, способная раскрываться посекционно при создании избыточного давления во внутреннем объеме (рис. 6).

При этом сохраняются требования к конфигурации межстеночного пространства и соотношениям геометрических параметров, выраженным соотношениями (1), (2). Конструктивное решение, позволяющее герметично соединить между собой по малым радиусам наружные конические оболочки, обеспечив при этом возможность одновременного раскрытия связанных преобразуемых поверхностей, представлено на рис. 6, а, б. Герметичность и взаимная подвижность контуров K_1 и K_2 , образованных кромками радиальных отверстий в донышках технологического

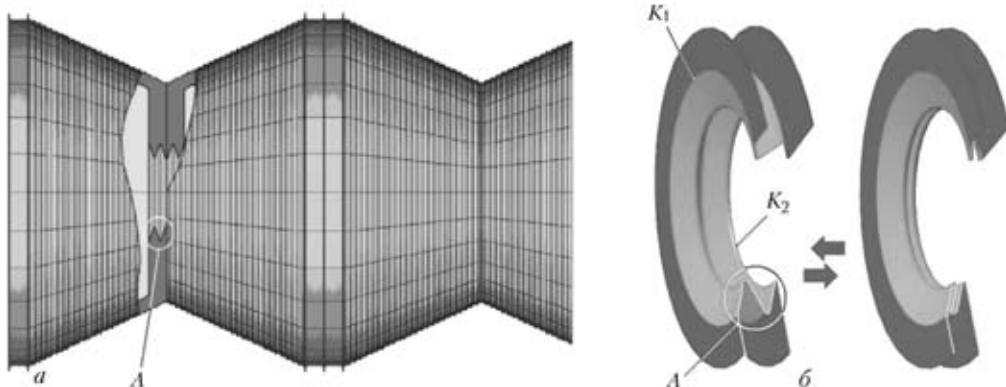


Рис. 6. Конструктивная схема многоконусной КПО периодического профиля (а) и компенсирующая кольцевая мембрана (б) в раскрытом и сложенном состоянии; K_1 и K_2 — радиальные контуры, связанные соответственно с внутренней и наружной преобразуемой оболочкой конструкции; А — складка компенсирующей кольцевой мембраны



кессона с объемом V_K (рис. 6, б) обеспечивается компенсирующей кольцевой мембраной со складкой, обратимо изменяющей угол раскрытия при преобразовании каждого последующего гофра двухстенчатой КПО. Радиусы контуров K_1 и K_2 (R_{K1} и R_{K2}) определяются конструктивными и технологическими соображениями, а соотношение (2) для многоконусной КПО приобретает вид $r_m = \sqrt{r^2 + R_K^2}$, где $R_K = \frac{R_{K1} + R_{K2}}{2}$ — среднее значение радиуса складки кольцевой мембраны.

Выводы

1. В исследуемом диапазоне геометрических параметров двухстенчатых КПО оптимальной является конструкция, в которой прямолинейные и кольцевые соединения с различными требованиями к прочности и пластичности сварных швов выполняются способами микроплазменной и лазерной сварки.

2. Исследованная технология создания неразъемных тонколистовых соединений из аустенитной нержавеющей стали позволяет обеспечить герметичность деформируемых оболочек как в процессе формоизменения, так и при обратном преобразовании с помощью избыточного давления.

3. Полное преобразование двухстенчатых КПО конического типа до проектного размера путем создания во внутренней полости избыточного давления возможно при соблюдении определенных

Transformable-shell structures (TSS) of a conical type are considered which are a unique development of PWI and have no foreign analogs. Technical solutions are proposed, which allow improvement of the reliability of shell TSS, as well as technological approaches to their realization. A brief description of the technology of producing permanent joints on sheets of austenitic stainless steel, capable of ensuring the leak-tightness of deformable shells, is given.

закономерностей геометрических параметров их внутренней и наружной оболочек. Необходимые соотношения рабочих объемов воздуха в межстеночном пространстве конструкции определяются относительными значениями радиусов ее оснований и не зависят от угла конусности боковых поверхностей при соблюдении условия их изометричности.

4. Конструкция, полученная герметичным соединением между собой двухстенчатых конических КПО, сохраняет функциональные свойства входящих в ее состав преобразуемых элементов. При этом изменение конфигурации межстеночных промежутков каждой двухстенчатой оболочки, связанное с необходимостью объединения внутреннего пространства конструкции в единый объем, должно сопровождаться соблюдением установленных зависимостей геометрических параметров на соединительных узлах.

1. *Космос: технологии, материаловедение, конструкции*. Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с.
2. *Расчет и особенности технологии изготовления крупногабаритной сварной конструкции преобразуемого объема* / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. Н. Самилев и др. // Автомат. сварка. — 2006. — № 7. — С. 3–12.
3. *Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали* / В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, В. П. Гаращук и др. // Там же. — 2011. — № 4. — С. 45–49.
4. *Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Волков В. С. Конструкции преобразуемого объема (Обзор)* // Там же. — 2011. — № 12. — С. 30–39.

Поступила в редакцию 22.05.2012

НОВАЯ КНИГА

М. О. Карпаш, І. В. Рибіцький, Т. Т. Котурбаш, О. Г. Бондаренко, О. М. Карпаш.
Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі.
— Вид-во ІФНТУНГ, 2012. — 420 с.

Монографія присвячена вирішенню важливого науково-технічного завдання — удосконалення методів і засобів акустичного контролю об'єктів підвищеної небезпеки, якими є бурове та нафтогазове устаткування, безпосередньо в умовах експлуатації. Авторами роботи успішно вирішена важлива науково-технічна проблема нафтогазової галузі — суттєве зменшення аварій та відмов нафтогазового устаткування й інструменту шляхом розроблення, впровадження нових методів і засобів виявлення на ранній стадії розвитку різних дефектів експлуатаційного походження методами неруйнівного контролю, у першу чергу акустичного.

Призначена для науковців — фахівців у галузі технічної діагностики і контролю конструкцій та устаткування, аспірантів, магістрів, студентів технічних спеціальностей.

*По вопросам приобретения обращаться
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»*

