

М417493

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена  
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище  
имени Н.Э.Баумана

НА ДОМ  
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

АРТЕМОВ БОРИС СТЕПАНОВИЧ

УДК 621.643.43

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ПРОЦЕССА  
ГИДРОГЕОБРАЗОВАНИЯ ОБОЛОЧЕК КОМПЕНСАТОРОВ

Специальность 05.03.05 - "Процессы и машины  
обработки давлением"

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени кандидата  
технических наук

Москва 1984

Работа выполнена в НПО "Пензахиммаш".

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор  
А.Г.ОВЧИННИКОВ

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники  
РСФСР, д-р техн. наук, профессор  
Е.И.СЕМЕНОВ

Канд. техн. наук, доцент  
С.С.СОЛОВЦОВ

Ведущая организация: ВНИИНЕДТЕМАШ

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 198\_\_ г.

в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного Совета  
К 053.15.13 Москва \_\_\_\_\_ Октябрьской  
Революции и о \_\_\_\_\_ х-  
нического уч \_\_\_\_\_ ква,  
2-я Бауманс

С диссертаци \_\_\_\_\_ баумана.

Автореферат

Ученый секр  
специализир  
д.т.н.  
доцент

М417493

Актуальность темы. XXVI съезд КПСС поставил задачу повышения производительности труда за счет более эффективного использования результатов научных достижений при создании прогрессивной техники и технологии при одновременном улучшении качества продукции и всесторонней экономии материальных ресурсов страны. Необходимость непрерывного совершенствования конструкций технологического оборудования для химической, нефтяной, газовой и других отраслей промышленности обуславливает предъявление более высоких технических требований как в целом к оборудованию, так и к отдельным его деталям и узлам, в том числе и к компенсирующим устройствам. На основании многочисленных исследований установлено, что технические характеристики компенсирующих устройств – компенсаторов различной конструкции определяются геометрической формой и материалом гибкого гофрированного элемента.

В последние годы наметилась тенденция к изготовлению таких деталей гидравлической штамповкой. При этом повышается качество гофрированных элементов благодаря отсутствию кольцевых сварных швов в сечениях с максимальными рабочими напряжениями, уменьшается трудоемкость изготовления, а коэффициент использования металла (Ким) возрастает до 0,85. Расширение номенклатуры высококачественных гофрированных оболочек компенсаторов, изготавливаемых гидравлической штамповкой, и широкое промышленное внедрение этого способа сдерживается отсутствием научно-обоснованных рекомендаций для определения технологических параметров и практических рекомендаций по реализации технологических процессов и разработке специализированного оборудования, оснастки и инструмента. Поэтому разработка и реализация эффективного способа гидравлической штамповки гофрированных элементов компенсаторов различной конструкции, разработка научно-обоснованной методики проектирования и практических рекомендаций для широкого внедрения этого способа в производство являются актуальными вопросами.

Цель работы. Создание малоотходного технологического процесса гидрогофрообразования коротких цилиндрических оболочек с разработкой научно обоснованной методики, обеспечивающей расчетное определение необходимых технологических параметров процесса и проектирование технологической оснастки.

НБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1417493

Артемьев Б.С. Разработка, ис



Научная новизна. Уточнен характер течения металла и выявлен очаг деформаций при гидрогидрообразовании коротких цилиндрических оболочек с разнообразной геометрией гофр. Получены решения по каждой стадии деформирования с выводами формул для определения деформаций, напряжений и силовых параметров процесса. Установлена взаимосвязь силовых параметров и их критических значений из условий устойчивости заготовки на всех стадиях ее деформирования. Выявлены предельные значения деформаций заготовки в процессе гидрогидрообразования.

Практическая ценность. Настоящая работа является составной частью плановых научно-исследовательских работ ВНИИПТхиммаша (г. Пенза) в области технологии изготовления компенсаторов и работ ВНИИнефтемаша (г. Москва) в части конструкций компенсирующих устройств.

В результате проведения исследований разработана научно обоснованная методика инженерных расчетов по определению технологических параметров и средств технологического обеспечения при изготовлении гибких элементов компенсаторов методом гидроформования в условиях промышленного производства.

Реализация результатов работы в промышленности. Полученные результаты положены в основу разработок технологических процессов и средств технологического обеспечения процесса гидрогидрообразования оболочек компенсаторов  $D_y = 300-1200$  мм по ОСТ 26-01-1504-76 + ОСТ 26-01-1512-76 в производственных условиях объединения НПО "Пензхиммаш" (г. Пенза) и завода "Павлоградхиммаш" (г. Павлоград). Результаты исследований приняты для разработки отраслевых стандартов на компенсаторы с повышенными рабочими параметрами. Общий Экономический эффект от внедрения процесса гидрогидрообразования оболочек компенсаторов составляет 153,2 тыс. рублей.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на всесоюзном научно-техническом семинаре "Современные методы изготовления фасонных деталей трубопроводов в химическом и нефтяном машиностроении" (г. Пенза, сентябрь 1974 г.) и на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация обработки давлением" МВТУ им. Баумана (г. Москва, 1982 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 печатных работ .

Объем работы. Диссертация содержит 164 страниц машинописного текста, 21 таблиц, 59 рисунков и список использованной литературы ( 87 наименований).

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В этой главе на основании обобщения результатов изучения литературных источников, патентной информации, а также непосредственного обследования промышленного производства компенсаторов и сильфонов рассмотрены относительные достоинства и недостатки основных групп технологических методов изготовления поперечно гофрированных гибких элементов.

Обобщение отечественного и зарубежного опыта дало возможность установить, что применение гидравлического способа гофрообразования позволяет изготавливать гибкие элементы наиболее разнообразной конструкции (многослойные из различного вида материалов, армированные, омегаобразные и т.д.) и тем самым обеспечивает производство компенсаторов, удовлетворяющих требованиям современного развития техники в различных отраслях машиностроения.

Анализ известных исследований процесса гидрогофрообразования оболочек показал, что этот прогрессивный процесс формообразования изучен не достаточно полно при поперечном гофрировании коротких оболочек, а результативные материалы исследований не позволяют получить минимума необходимых данных для практических расчетов проектирования технологических процессов и оснастки при промышленном производстве гибких элементов компенсаторов.

Исходя из изложенного, определены следующие задачи исследования:

1. Разработка технологического процесса гидрогофрообразования коротких цилиндрических оболочек при изготовлении гибких элементов компенсаторов.
2. Теоретическое решение задачи о распределении напряжений и об определении силовых параметров гидравлической штамповки при гофрировании коротких оболочек.
3. Теоретическое решение задачи по определению предельных деформаций заготовки, нагруженной внутренним давлением и подвергаемой осевому сжатию.
4. Экспериментальное определение деформированного состояния заготовки, технологических возможностей и параметров процесса, подтверждение достоверности результатов, а также получение эмпирических зависимостей для расчетов.

5. Выработка рекомендаций по практическому использованию результатов исследований.

6. Внедрение результатов исследований в производство.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОГООБРАЗОВАНИЯ ОБОЛОЧЕК КОМПЕНСАТОРОВ

В главе дан анализ напряженно-деформированного состояния замкнутой цилиндрической заготовки на различных стадиях процесса гофрообразования, а также определены предельные деформации.

На начальной стадии процесса стенка оболочки получает упруго-пластический прогиб под действием только внутреннего давления жидкости. После этого наступает вторая стадия деформирования, в процессе которой при одновременном воздействии внутреннего давления жидкости и осевого сжатия происходит формирование гофра заданной формы и размеров.

В процессе теоретического анализа рассмотрены две стадии деформирования: предварительное упругое выпучивание стенки заготовки между секциями матриц и окончательное гофрообразование в результате пластического деформирования.

Естественно, что деформации заготовки на первой стадии процесса предопределяют ее деформирование на второй.

В первой стадии деформации стенки заготовки не превышают 6%, поэтому анализ напряженно-деформированного состояния оболочки на первой стадии проводится по теории малых упруго-пластических деформаций (по А.А.Ильюшину).

На первой стадии процесса при безмоментном осесимметричном нагружении, используя уравнения равновесия и уравнения связи напряжений с деформациями, найдем отношение меридионального напряжения к окружному в зависимости от начального  $R_0$  и текущего  $R_1$  радиусов оболочки.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = \frac{R_1^2 - R_0^2}{2R_1^2} . \quad (1)$$

В результате численного решения в области  $R_1 = (1,01 + 1,04)R_0$  находим

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} \leq 0,054 . \quad (2)$$

Это соотношение позволяет принять в дальнейшем  $\sigma_r \approx 0$  и допустить, что в конце первой стадии упруго-пластического дефор-

мирования оболочка находится в условиях линейного напряженного состояния. Используя условие пластичности по гипотезе Сен-Венана  $\sigma_{\theta} = K \sigma_s$ , и установив значения деформаций, находим выражение для определения внутреннего давления жидкости.

$$q_1 = \frac{2P_1^2}{\sqrt{3P_1^4 + R_0^4}} \left( \frac{R_0^2}{P_1} \right)^{\frac{6P_1^2}{3P_1^2 + R_0^2}} \cdot \frac{\delta_0}{R_0} \cdot \sigma_{s1} \quad (3)$$

Прогиб стенки заготовки в конце первой стадии процесса выражается через угол выпучивания  $\gamma^0$ , который, в свою очередь, определяется углами поворота сечений оболочки на упругих участках очага деформаций, или

$$\omega_1 = 0,3 \frac{1}{\beta} \left[ \left( \frac{\delta}{\beta f} + 1 \right) - 8 \frac{K_1(\mathcal{L})}{e^{2\mathcal{L}}} \right], \quad (4)$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{R_0^2 \cdot \delta_0^2}}, \quad \mathcal{L} = \frac{\beta l_0}{2};$$

$\mu$  — коэффициент Пуассона материала оболочки;

$l_0$  — начальная длина оболочки;

$f$  — площадь сечений секций матриц;

$K_1$  — функции А.И. Крылова.

Если принять, что длина упругих участков оболочки не изменяется, то длина меридиональной образующей будет

$$L_{обр} = l_0 \left( \frac{R_0}{P_1} \right)^{\frac{2R_0^2}{3P_1^2 + R_0^2}} + \left[ 1 - \left( \frac{R_0}{P_1} \right)^{\frac{2R_0^2}{3P_1^2 + R_0^2}} \right] \frac{\pi}{2\beta} \quad (5)$$

В начале второй стадии процесса, когда прикладывается осевое усилие сжатия, для дальнейшего пластического деформирования необходимо соблюдать условие пластичности с учетом изменения интенсивности деформаций, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{s1} &= \sigma_{s2} \text{ начальное} \\ \varepsilon_{i1} &= \varepsilon_{i2} \text{ начальное} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Соотношения между главными напряжениями должны обеспечить равномерную деформацию оболочки. Это условие можно записать через производные внешних нагрузок  $Q_{2 \text{ нач.}}$  и  $Q_2 \text{ нач.}$  следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_{2 \text{ нач.}}}{d\varepsilon_{i2 \text{ нач.}}} &= 0 \\ \frac{dQ_2 \text{ нач.}}{d\varepsilon_{i2 \text{ нач.}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение системы из уравнений равновесия и пластичности вида  $\sigma_{r2 \text{ нач.}} - \sigma_{\theta 2 \text{ нач.}} = K \sigma_{s1}$  с использованием уравнения связи между напряжениями и деформациями и при соблюдении условий (6) и (7) позволяет найти напряжения, которые определяют необходимые силовые параметры в начале второй стадии процесса:

внутреннее давление

$$Q_{2 \text{ нач.}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_0}{R_0} \cdot \sigma_{s1} ; \quad (8)$$

осевое давление сжатия

$$Q_2 \text{ нач.} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2P_1 - R_0}{P_1 + R_0} . \quad (9)$$

Отношение (8) и (3) показывает, что наличие осевого усилия сжатия в начале второй стадии процесса снижает необходимое для активных пластических деформаций заготовок внутреннее давление.

Для анализа напряжений и деформаций в конце второй стадии процесса выбирается один гофр наиболее сложной геометрической формы, который рассматривается как деформированная осесимметричная оболочка с очагом деформаций, состоящим из трех участков, каждый из которых имеет постоянный радиус кривизны в меридиональном сечении.

Приняв закон изменения текущей толщины в зависимости от радиуса вида

$$\delta_i = \delta_0 \cdot \frac{R_0}{\rho_i} , \quad (10)$$

получаем плоское деформированное состояние оболочки. Через урав-

нения связи между напряжениями и деформациями получаем отношение напряжений

$$\frac{\sigma_{PK}}{\sigma_{BK}} = -\frac{1}{2} \quad (II)$$

Из системы, включающей уравнения равновесия, условия пластичности вида  $\sigma_{BK} - \sigma_{PK} = K \cdot \sigma_{BK}$  и отношение (II), а также с учетом геометрических размеров, получаем однородные дифференциальные уравнения для каждого участка очага деформации. В результате решения каждого уравнения определяем значения напряжений, а по их максимальным значениям на гребне волны находим расчетные формулы внешних нагрузок:

внутреннего давления

$$Q_K = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_0}{R_0 + H} \cdot \sigma_{BK} \quad (I2)$$

осевого давления сжатия

$$Q_K = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{(1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} - 2 \frac{R_0 + H - Z_I}{R_0 + H - Z_I})}{(1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} + 2 \frac{R_0 + H - Z_I}{R_0 + H - Z_I})} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{R_0 \sigma_0}{4} \left[ \frac{1}{Z_{II}(R_0 + Z_{II})} \times \right. \right. \\ \left. \left. x \left( 1 + \frac{H - Z_I - Z_{II}}{R_0 + Z_{II}} \right)^{(1 - \sqrt{\frac{\pi}{2}})} + \frac{1}{Z_I(R_0 + H - Z_I)} \right] x \frac{1}{\left( 1 + \frac{H - Z_I - Z_{II}}{R_0 + Z_{II}} \right)^{(1 - \sqrt{\frac{\pi}{2}})}} \right\} \sigma_{BK} \quad (I3)$$

где  $\sqrt{\pi}$  — коэффициент трения;

$H$  — высота гофры;

$Z_{II}$  — радиус при основании гофры;

$Z_I$  — радиус вершины гофры;

$h, b$  — размеры, характеризующие прямой участок гофры между радиусами.

При анализе напряжений и деформаций любого промежуточного момента во второй стадии процесса ход исследований остается таким же, но при этом учитываются следующие условия:

— формообразование происходит последовательно, начиная с третьего участка очага деформаций;

— силы трения появляются только после контакта оболочки с матрицей.

Эти условия позволяют сделать допущение о равенстве меридионально-осевых напряжений на I и II участках очага деформаций. В результате получаем расчетные формулы для определения внешних нагрузок в любой промежуточный момент второй стадии процесса:

для внутреннего давления

$$Q_{np} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta_0}{R_0 + H_{np}} \cdot \sigma_{snp}, \quad (14)$$

для осевого давления сжатия

$$Q_{np} = \frac{2 \left[ \frac{1}{3} + \frac{R_0 \delta_0}{4} \cdot \frac{\left(1 + \frac{H_{np} - z_{III}}{R_0 + z_{III}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{np}}{H_{np}}}\right)}{z_{III} (R_0 + z_{III})} \right]}{\sqrt{3} \left(1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} + 2 \frac{z_{III}}{R_0 + z_{III}}\right) \left(1 + \frac{H_{np} - z_{III}}{R_0 + z_{III}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{np}}{H_{np}}}\right)} \cdot \sigma_{snp}, \quad (15)$$

где

$H_{np}$  — промежуточная высота гофры;

$h_{np}, \delta_{np}$  — размеры, характеризующие прямой участок гофры между радиусами в промежуточном моменте.

При рассмотрении необходимых условий устойчивого состояния заготовки при деформировании следует учесть, что на основании результатов ряда исследований известно следующее:

- потери устойчивости оболочек носит ярко выраженный локальный характер и определяется условиями максимума деформирующих усилий, которые могут возникать одновременно;
- критерием потери устойчивости является деформация растяжения, соответствующая моменту образования шейки при растяжении.

Известно, что тонкостенная цилиндрическая заготовка при гидрораздаче не теряет своего устойчивого состояния в процессе пластического деформирования, если максимум внутреннего давления ограничивается значением окружной деформации, соответствующей потере устойчивости при растяжении

$$\epsilon_{\theta} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\psi_{\theta}}{1 - \psi_{\theta}}, \quad (16)$$

где  $\psi_{\theta}$  — относительное сужение образца металла оболочки в момент начала образования шейки.

В рассматриваемом случае оболочка на первой стадии процесса получает окружную деформацию значительно меньшую по величине, чем критическая (16), и следовательно, в этот момент заготовка будет всегда находиться в устойчивом состоянии.

В начале второй стадии процесса оболочка, нагруженная одновременно внутренним и осевыми давлениями, имеет упруго-деформированные участки очага деформаций.

Если любой упругий участок рассматривать как самостоятельную нагруженную оболочку без начального прогиба стенки, то согласно расчету ее устойчивое состояние в пределах упругости будет сохраняться при значении безразмерных параметров внешних нагрузок следующей величины:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q} &= 0,45 \\ \bar{Q} &= 0,605 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

В нашем случае  $\bar{Q} = \bar{Q}$ , следовательно, в начальный момент второй стадии процесса гидрогазообразования при упругих деформациях на упругих участках заготовка не теряет устойчивости, если величина осевого давления соответствует расчетной по (9) и осуществляется при наличии внутреннего давления, определяемого по (8).

Устойчивость заготовки на второй стадии процесса определяется через значения критических нагрузок с использованием значения деформаций соответствующего момента образования шейки при растяжении:

в окружном направлении, когда  $\frac{dQ_K}{d\epsilon_{i2}} = 0,$

в осевом направлении, когда  $\frac{dQ_K}{d\epsilon_{i2}} = 0.$

В данном случае окружная деформация максимальная. Учитывая формулу С.И.Губкина  $\sigma_s = \frac{\sigma_s}{1-\psi_w} \left( \frac{\psi}{\psi_w} \right)^{\frac{\psi_w}{1-\psi_w}}$ , получим выражение для определения внутреннего давления:

$$Q_K = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_0}{\rho_{i2}} \cdot \frac{\sigma_s}{1-\psi_w} \cdot \left( \frac{\psi}{\psi_w} \right)^{\frac{\psi_w}{1-\psi_w}}. \quad (18)$$

Приравняв производную от (18) по  $d\epsilon_{i2}$  к нулевому значению и найдя зависимость относительного сужения поперечного сечения от текущего радиуса в виде  $\psi = \frac{\rho_{i2} - R}{\rho_{i2}}$ , получим предельную величину текущего радиуса.

$$\rho_{i2 \max} = \frac{R_0}{1-\psi_w}, \quad (19)$$

или

$$\rho_{i2 \max} = (1 + \epsilon_{\text{расст}}) R_0. \quad (20)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОГОФРООБРАЗОВАНИЯ КОМПЕНСАТОРОВ

В главе приводятся результаты экспериментального исследования напряженного и деформированного состояний замкнутой цилиндрической заготовки, находящейся под воздействием внутреннего давления и жесткого осевого сжатия на всех стадиях процесса гофрообразования.

Экспериментально решались следующие задачи:

- апробация приемлемости упрощающих допущений, принятых при теоретических исследованиях;
- подтверждение теоретических выводов по определению основных параметров процесса и их взаимосвязи;
- определение возможности упрощения аналитических выражений.

При изучении процесса гидрогофрообразования установлено, что к основным и безусловно необходимым для осуществления процесса, а также его управления параметрам следует отнести следующие:

- изменение исходной толщины стенки заготовки;
- изменение исходной (меридиональной) длины заготовки;
- изменение прогиба стенки заготовки;
- значения предельных деформаций заготовки;
- значение внутреннего давления жидкости;
- значение давления жесткого осевого сжатия по торцу заготовки.

Экспериментально было исследовано влияние каждого параметра в отдельности на деформирование заготовки, а также найдены оптимальные значения каждого параметра по ходу процесса формообразования гофр различной геометрической формы (прямых, с поднутрением и омегаобразных).

В экспериментальном плане получена объективная оценка устойчивости заготовки при гидрогофрообразовании коротких оболочек.

Для проведения экспериментов применялось различное оборудование как в лабораторных, так и в производственных условиях. Операция гидрогофрообразования осуществлялась на специальной опытно-промышленной установке ГФ-I (усилие  $P=6000$  кН (600 тс), на гидравлических прессах ДА2238 (усилием  $P=6300$  кН (630 тс) и ДА 2240 (усилием  $P=10000$  кН (1000 тс) с применением опытных и промышленных штампов.

Давление жидкости измерялось манометрами типа МО-160х600х0,4 ГОСТ 6521-72 и МО-250х600х0,15 ГОСТ 6521-72.

Ортогональная сетка на наружной поверхности испытываемых заготовок наносилась разметкой при помощи станка модели ВИ81. Искажения размеров ячеек сетки измерялись на вырезанных образцах микроскопом ММ-2, ГОСТ 8074-56.

Измерение толщины заготовки по образующей гофр производилось прибором ГСПУТ-91П "Кварц-15".

Обработка результатов экспериментов производилась с помощью ЭВМ.

Исследуемые металлы: стали ВСт 3сп, ГОСТ 380-71; 12Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т, ГОСТ 5632-72.

Экспериментальные исследования проводились на изготовленных натурных образцах компенсаторов, а также образцах-моделях. Обработка данных экспериментальных исследований позволила установить зависимости для деформаций

окружной:

$$\epsilon_{\theta} = \epsilon_n \frac{R_i}{R_0},$$

$$\text{меридиональной: } \epsilon_r = \epsilon_n \frac{R_0}{R_i} - \epsilon_n \left[ 0,5 \left( \frac{R_0}{R_i} + 0,92 \right) \right], \quad (21)$$

радиальной:

$$\epsilon_z = \epsilon_n \left[ 0,5 \left( \frac{R_0}{R_i} + 0,92 \right) \right].$$

Изменение длины заготовки в меридиональном направлении позволяет принять деформированное состояние плоским. Это допущение использовано при теоретическом анализе.

По значениям деформаций (21) были получены эмпирические формулы для определения изменений исходной толщины заготовки:

$$\delta_i = \delta_0 \left[ 0,5 \left( \frac{R_0}{R_i} + 0,92 \right) \right]; \quad (22)$$

исходной меридиональной длины заготовки:

$$l_0 = \frac{\mathcal{L}}{0,127 \frac{R_i}{R_0} + 0,89}, \quad (23)$$

где -  $\mathcal{L}$  - развернутая длина гофры.

При исследовании напряженного состояния заготовки в очаге упруго-пластических деформаций первой стадии получена картина распределения напряжений, установлена величина необходимого прогиба стенки заготовки, а также взаимосвязь прогиба стенки заготовки с величиной необходимого внутреннего давления жидкости.

Экспериментально подтверждено допущение о линейном характере напряженного состояния заготовки на первой стадии процесса, получены эмпирические формулы для определения величины прогиба стенки заготовки:

$$\omega_1 = 0,25 \sqrt{R_0 \delta_0} \quad (24)$$

и необходимого для этого внутреннего давления жидкости:

$$q_1 = 1,1 \frac{\delta_0}{R_0} \cdot \sigma_{s1} \quad (25)$$

Исследование напряженного состояния заготовки в очаге пластических деформаций на второй стадии позволило установить закономерность изменения силовых параметров, а также из взаимосвязь при переходе из упругого состояния в пластическое. При этом получены эмпирические формулы для определения величины внутреннего давления жидкости

для начального момента второй стадии процесса:

$$q_2 = 0,7 \frac{\delta_0}{R_0} \cdot \sigma_{s1} \quad (26)$$

и для любого момента второй стадии процесса:

$$q_i = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta_0}{R_0 + \omega_i} \cdot \sigma_{s1} \quad (27)$$

где  $\omega_i$  — величина прогиба стенки заготовки для рассматриваемого момента.

Установлены эмпирические формулы для определения величины давления сжатия на торце заготовки для начального момента:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{s1} \quad (28)$$

для любого промежуточного момента:

$$Q_i = 0,34 \frac{R_0}{R_0 + \omega_i} \cdot \sigma_{s1} \quad (29)$$

для окончания второй стадии процесса:

$$Q_K = 0,48 \frac{R_0}{R_0 + H} \cdot \sigma_{sK} \quad , \quad (30)$$

где  $H$  — окончательная величина высоты гофры.

Экспериментально установлены предельные деформации заготовки:

— равномерная деформация сохраняется до значения окружной деформации  $\epsilon_{\theta} \approx \delta_s$  ;

— разрушение стенки заготовки наступает при величине окружной деформации  $\epsilon_{\theta} \approx 2\delta_s$  .

Проведенная оценка сходимости расчетных данных, обобщающих аналитические решения с данными экспериментов и с результатами расчетов по эмпирическим формулам, позволяет заключить, что экспериментальные исследования подтверждают результаты теоретического анализа.

#### РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Итогом данной работы явилось создание промышленной технологии и средств технологического оснащения производства гофрированных элементов по ОСТ-26-01-1504-76 + ОСТ 26-01-1512-76 на заводах ВГЮ "Союзхиммаш" Министерства химического и нефтяного машиностроения.

Внедрение процесса гидрогофрообразования оболочек компенсаторов Ду = 300 мм, 600 мм, 1000 мм и 1200 мм было осуществлено в НПО "Пензхиммаш" в 1982 году; оболочек компенсаторов Ду = 250 мм, 300 мм, 400 мм и 600 мм на заводе "Павлоградхиммаш" в 1983 году. До внедрения процесса гидрогофрообразования гофрированные гибкие элементы компенсаторов до Ду = 1200 мм на обоих предприятиях изготавливались методом штамповки и сварки полуинз. На заводе "Пензхиммаш" гибкие элементы с Ду > 1200 мм изготавливаются методом гибки гофр на сортогибочном оборудовании. Внедрение процесса гидрогофрообразования было осуществлено с использованием имеющегося на заводе оборудования, а именно: пресса ДА 2238 усилием  $P=6300$  кН (630 тс) и установки ГФ-I усилием  $P=6000$  кН (600 тс) на заводе "Пензхиммаш" и пресса ДА2240 усилием  $P=10000$  кН (1000 тс) на заводе "Павлоградхиммаш".

Результаты проведенных исследований, отработка и внедрение на базе двух заводов ВПО "Союзхиммаш" технологического процесса гидрогофрообразования оболочек компенсаторов показали технико-экономические преимущества процесса при изготовлении гофрированных элементов компенсаторов.

Экономический эффект от внедрения результатов исследования составляет: в НПО "Пензхиммаш" - 144 тыс.руб., на заводе "Павлоградхиммаш" - 9,2 тыс.руб. в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Гидравлический способ гофрирования гибких элементов обеспечивает наиболее качественное изготовление компенсаторов любой конструктивной разновидности. На отечественных предприятиях этот способ не получил должного распространения из-за отсутствия научно обоснованной методики расчета технологических параметров процесса, а также практических рекомендаций по разработке средств технологического оснащения. Существующие теоретические и экспериментальные исследования способа гидрогофрообразования не дают инженерных методов определения необходимых технологических параметров гидрогофрообразования коротких ( $L = 2,5 \div 3,5$ ) заготовок.

2. Расчетные зависимости, полученные на основе анализа напряженно-деформированного состояния заготовки, с учетом факторов, влияющих на распределение напряжений, позволяют определить параметры процесса гидрогофрообразования, а также условия устойчивости заготовки.

На первой стадии процесса геометрия исходной заготовки, величина окружной деформации  $\epsilon_{\theta}$ , и механические свойства деформированного металла являются основными факторами, которые определяют значение внутреннего давления  $Q_1$ , а также размерные параметры деформированной заготовки  $L_{обр}$ ,  $D_1$  и  $\omega_1$ . Перечисленные факторы, определяющие параметры первой стадии процесса, а также дополнительно возникающий фактор трения и геометрия формируемой гофры определяют силовые параметры второй стадии  $Q_2$  и  $Q$ . При этом условия устойчивости заготовки на второй стадии процесса определяются связью силовых параметров  $Q_2$  и  $Q$  на второй стадии процесса.

3. Область оптимальных значений параметров процесса определяет технологические возможности операции гидрогофрообразования.

Так, локализация деформаций в очаге пластических деформаций наступает, когда окружающая деформация  $\epsilon_0$  достигает значения относительного удлинения  $\delta_5$  при разрыве пятикратного образца испытываемого металла; разрушение металла заготовки возникает, когда соответственно  $\epsilon_0 = 2 \delta_5$ .

4. Результаты экспериментальных исследований технологических параметров процесса гидрогидрообразования подтверждают достоверность аналитических зависимостей; позволяют изучить характер изменений и величину каждого из параметров; показывают возможность использования аналитических зависимостей для практических расчетов с погрешностью, не превышающей 15,5%. Выведенные на основании сравнения результатов теоретического анализа и экспериментов для определения значений некоторых технологических параметров процесса упрощенные эмпирические формулы могут быть рекомендованы для практических расчетов процессов гидрогидрообразования гибких элементов с высотой  $H \leq 0,5R_0$  и  $\alpha = 2,5 + 3,5$ .

5. Предлагаемая методика и разработанные на ее основе рекомендации позволяют обеспечить необходимыми данными инженерные расчеты по проектированию технологических процессов гидрогидрообразования, а также средств технологического оснащения при производстве гибких элементов компенсаторов различной конструкции.

6. Общий экономический эффект от внедрения процесса гидрогидрообразования в производство составляет 153,2 тыс. руб.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

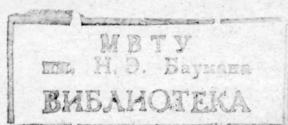
1. Артемов Б.С., Чамин А.Ф. Изготовление линзовых компенсаторов методом обкатки. — Химическое и нефтяное машиностроение, 1969, № 1, с. 35–37.
2. Овчинников А.Г., Артемов Б.С. Устойчивость заготовки при гидрогидрообразовании оболочек компенсаторов. — Вестник машиностроения, 1981, № 6, с. 54–56.
3. Овчинников А.Г., Артемов Б.С. Деформация заготовки при гидрогидрообразовании компенсаторов. — Вестник машиностроения, 1981, № 8, с. 60–61.
4. Овчинников А.Г., Артемов Б.С. Расчет силовых параметров, необходимых для гидрогидрообразования оболочек компенсатора. ВИНТИ, библиографический указатель — Депонированные рукописи, 1982, № 2, с. 88.
5. Логанов Д.Т., Федин Ю.А., Артемов Б.С. Малоотходная технология в кузнечно-прессовом производстве. — Химическое и нефтя-

ное машиностроение, 1983, № 8, с. 6-7.

6. Артемов Б.С. Силовые параметры операции гидрогидрообразования оболочек компенсаторов. — В кн.: Технология изготовления химического и нефтяного оборудования повышенной износостойкости с использованием прогрессивных способов литья, деформирования, применение износостойких материалов, сплавов, покрытий и специальных режимов термообработки.

— Пермь.: ПКТБХиммаш, 1983, с. 29-39.

*Артемов*



Подписано к печати 6.04.84

Тип МВТУ им. Н.Э.Баумана

Зак. 696 тир. 100

Л 76146 от 6.04.84