

УДК 621.791

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИСТОВОМ МЕТАЛЛЕ
ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЙ ГИБКИ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ**

**STUDY OF REGULARITIES OF RESIDUAL STRESS EMERGENCE
IN SHEET METAL AFTER BENDING OPERATIONS IN A COLD
STATE**

А.М. Файрушин, Д.А. Маркелов, И.А. Марченко

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

Airat M. Fairushin, Dmitriy A. Markelov, Ilya A. Marchenko

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation**

e-mail: OTSK@rusoil.net

Аннотация. От надежности функционирования оболочковых конструкций, широко применяемых в нефтеперерабатывающей отрасли промышленности, во многом зависит эффективность работы технологических установок нефтеперерабатывающих производств. Корпуса нефтеперерабатывающего оборудования оболочкового типа собираются из базовых элементов – обечаек и днищ, точность изготовления которых определяет технологичность производства и качество выпускаемого оборудования.

Цилиндрические обечайки корпусов нефтехимических аппаратов изготавливаются в основном с применением операции гибки-вальцовки. При этом в металле заготовки возникают неравномерные по толщине пластические деформации, приводящие к возникновению после разгрузки остаточных напряжений.

Многими авторами предложены различные методики определения уровня внутренних остаточных напряжений, возникающих в корпусе аппарата, однако большинство из них либо имеют большую погрешность при расчетах остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях, применяемых для изготовления корпусов аппаратов, которые при пластической деформации характеризуются нелинейным упрочнением, либо требуют использования сложного математического аппарата.

В данной работе на основе теоретических исследований предложен новый расчетный метод оценки остаточных напряжений, возникающих при изготовлении цилиндрических обечаек пластическим изгибом, который за счет учета нелинейного упрочнения металла заготовки позволяет получить более точные результаты по оценке остаточных напряжений в обечайке по сравнению с методами без учета упрочнения деформируемого металла или с учетом линейного упрочнения.

Abstract. The reliability of the operation of shell structures, widely used in the oil refining industry, in many respects depends on the efficiency of the technological installations of oil refineries. Shell-type oil refining equipment cases are assembled from the basic elements – shells and bottoms, manufacturing accuracy of which determines the manufacturability of production and the quality of the equipment produced.

The cylindrical shells of the petrochemical apparatuses casings are made mainly using the bending-rolling operation. In this case, plastic deformations uneven in thickness arise in the workpiece metal, which lead to the appearance of residual stresses after unloading.

Many authors have proposed various methods for determining the level of internal residual stresses arising in the apparatus body, however, most of them either have a large error in calculating the residual stresses in low-carbon steels used for the manufacture of apparatus bodies that are characterized by nonlinear hardening during plastic deformation or require the use of complex mathematical apparatus.

In this paper, on the basis of theoretical studies, we propose a new calculation method for estimating the residual stresses arising during the manufacture of cylindrical shells by plastic bending, which, due to the nonlinear hardening of the workpiece metal, makes it possible to obtain more accurate results on the assessment of residual stresses in the shell compared to methods without taking into account the hardening of the deformed shell. metal or taking into account linear hardening.

Ключевые слова: корпус аппарата; остаточные напряжения гибка металла обечайка

Key words: shell of vessel; residual stresses; metal bending; shell

Природа и механизм образования остаточных напряжений при пластическом изгибе исследованы и рассмотрены в работах отечественных и зарубежных ученых и исследователей С.П. Тимошенко, И.А. Биргера, А. Надаи, А.А. Ильюшина, В.В. Абрамова, Н.Н. Малинина, М.И. Лысова, Е.Н. Мошнина и др.

В работах многих из них рассмотрено возникновение остаточных напряжений при упругопластическом деформировании заготовки с учетом её линейного упрочнения. Данные методики имеют большую погрешность при расчетах остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях, применяемых для изготовления корпусов аппаратов, которые при пластической деформации характеризуются нелинейным упрочнением.

В работе [1] рассмотрено возникновение остаточных напряжений в детали при её гибке, даны методики для определения остаточных напряжений при упругопластической деформации со степенным законом упрочнения. Приводятся отдельные зависимости для определения остаточных напряжений в упругой и в пластической зонах. Однако для определения напряжений по данному методу необходимо замерять радиусы кривизны до и после деформации, что повышает погрешность расчетов и их трудоемкость.

В работе [2] приводятся методики расчетов остаточных деформаций и напряжений в металлах при упругих и упругопластических деформациях. Рассмотрено возникновение остаточных напряжений при упругопластическом деформировании с учетом степенного упрочнения материала. Однако при расчете применяются коэффициенты, значения которых неизвестны для многих материалов, также используется сложный математический аппарат, что затрудняет решение задачи.

В данной работе проведены расчетные исследования закономерностей возникновения остаточных напряжений по толщине заготовки для случая чистого упругопластического изгиба с учетом упрочнения металла по степенному закону $\sigma = k\varepsilon^n$ [3, 4].

При изгибе плоской прямоугольной листовой заготовки (рисунок 1) деформации по толщине изменяются по линейному закону согласно выражению

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 = (l_1 - l_0) / l_0 = \frac{(R + z) \cdot \alpha - R \cdot \alpha}{R \cdot \alpha} = \frac{z}{R}, \quad (1)$$

где Δl – абсолютная деформация слоя, удаленного от серединной линии на расстояние z ;

l_0 – исходная длина слоя;

l_1 – длина слоя после деформирования;

R – радиус кривизны нейтральной линии в конце деформирования;

α – угол изгиба пластины.

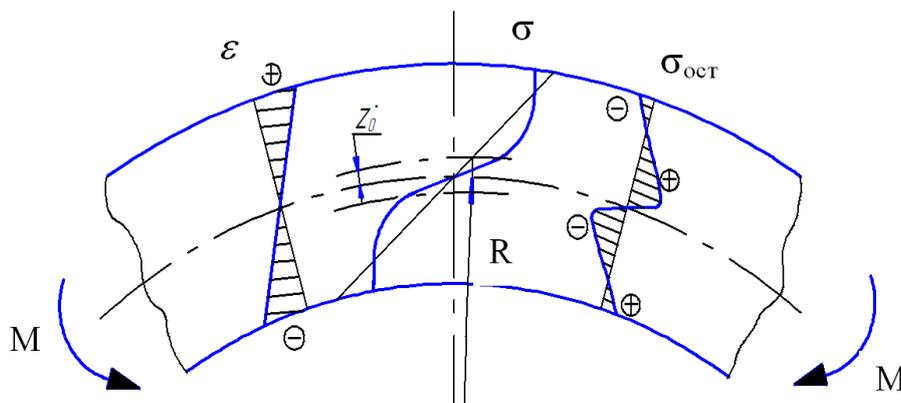


Рисунок 1. Схема распределения деформаций и остаточных напряжений по толщине заготовки при упругопластическом изгибе

Предполагается, что в окрестности нейтрального слоя металл при вальцовке деформируется по линейному закону упругости $\sigma = E\varepsilon$. Полуширина упругой зоны при этом определяется из выражения (1) при условии, что максимальная упругая деформация $\varepsilon = \sigma_{ny} / E$:

$$z_0 = \frac{\sigma_{ny}}{E} \cdot R, \quad (2)$$

где σ_{ny} – предел пропорциональности деформируемого материала;

E – модуль упругости I рода.

Суммарный изгибающий момент по сечению металлической пластины определяется как сумма элементарных моментов напряжений для упругой и пластической областей для сжатой и растянутой зон:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^{z_0} \sigma_y \cdot z dz + \int_{z_0}^{s/2} \sigma_{nl} \cdot z dz + \int_{-z_0}^0 \sigma_y (-z) dz + \int_{-s/2}^{-z_0} \sigma_{nl} (-z) dz = \\ &= 2 \int_0^{z_0} \varepsilon \cdot E z dz + 2 \int_{z_0}^{s/2} k \varepsilon^m z dz = \\ &= 2 \int_0^{z_0} \frac{z}{R} E z dz + 2k \int_{z_0}^{s/2} \left(\frac{z}{R}\right)^m z dz = \frac{2E}{R} \int_0^{z_0} z^2 dz + \frac{2k}{R^m} \int_{z_0}^{s/2} z^{m+1} dz = \\ &= \frac{2E}{R} \cdot \frac{z^3}{3} \Big|_0^{z_0} + \frac{2k}{R^m} \cdot \frac{z^{m+2}}{m+2} \Big|_{z_0}^{s/2} = \frac{2E}{R} \cdot \frac{z_0^3}{3} + \frac{2k}{R^m \cdot (m+2)} \cdot \left(\frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} - z_0^{m+2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_y – упругие напряжения;

σ_{nl} – напряжения в области пластического деформирования;

s – толщина листа обечайки;

k и m – параметры степенного закона упрочнения [3].

Остаточные напряжения по толщине обечайки определяются вычитанием из напряжений, действующих в конечный момент изгиба, условных напряжений разгрузки, которые находятся по формуле

$$\sigma_z = z \cdot \frac{M}{J_x}, \quad (4)$$

где J_x – момент инерции сечения заготовки единичной ширины, т.е.

$$J_x = \frac{b \cdot s^3}{12} = \frac{1 \cdot s^3}{12} = \frac{s^3}{12}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в выражение (4), получаем

$$\sigma_z = 12z \frac{M}{s^3}.$$

Остаточные напряжения для упругой области ($z \leq z_0$) равны

$$\sigma_{ocm} = \sigma_y - \sigma_z = E \cdot \varepsilon - \sigma_z = E \cdot \frac{z}{R} - 12z \frac{M}{s^3} = z \left(\frac{E}{R} - 12 \frac{M}{s^3} \right). \quad (6)$$

Остаточные напряжения для пластической области деформирования ($z > z_0$):

$$\sigma_{ocm} = k \cdot \varepsilon^m - \sigma_z = k \cdot \frac{z^m}{R^m} - 12 \cdot z \cdot \frac{M}{s^3}. \quad (7)$$

Остаточные напряжения являются самоуравновешивающимися по сечению детали, на которую после разгрузки не действуют внешние силы, поэтому сумма напряжений и сумма моментов от напряжений по сечению детали равны нулю. Из-за симметрии эпюры напряжений относительно нейтрального слоя (рисунок 1) первая сумма автоматически равна нулю. Для проверки равенства нулю суммы моментов выражение записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} J_m &= \int_{-s/2}^{s/2} \sigma_{ocm} \cdot z dz = \int_0^{z_0} z^2 \left(\frac{E}{R} - 12 \cdot \frac{M}{s^3} \right) dz + \int_{z_0}^{s/2} \left(k \frac{z^{m+1}}{R^m} - 12 \cdot z^2 \cdot \frac{M}{s^3} \right) dz = \\ &= \frac{z^3}{3} \left(\frac{E}{R} - 12 \cdot \frac{M}{s^3} \right) \Big|_0^{z_0} + k \cdot \frac{z^{m+2}}{R^m \cdot (m+2)} \Big|_{z_0}^{s/2} - 12 \cdot \frac{z^3}{3} \cdot \frac{M}{s^3} \Big|_{z_0}^{s/2} = \end{aligned} \quad (8)$$

$$= \frac{z_0^3}{3} \left(\frac{E}{R} - 12 \cdot \frac{M}{s^3} \right) + \left(\frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} - z_0^{m+2} \right) \cdot \frac{k}{R^m \cdot (m+2)} - 4 \cdot \frac{M}{s^3} \left(\frac{s^3}{8} - z_0^3 \right).$$

После раскрытия скобок в последнем выражении получаем:

$$\begin{aligned} J_m = & \frac{z_0^3}{3} \cdot \frac{E}{R} - \frac{4 \cdot z_0^3}{s^3} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot z_0^3}{3 \cdot R} - \frac{4 \cdot z_0^3}{s^3} \cdot \frac{2 \cdot k}{R^m \cdot (m+2)} \cdot \frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} + \\ & + \frac{4 \cdot z_0^3}{s^3} \cdot \frac{2 \cdot k}{R^m \cdot (m+2)} \cdot z_0^{m+2} + \frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} \cdot \frac{k}{(m+2) \cdot R^m} - \frac{z_0^{m+2} \cdot k}{(m+2) \cdot R^m} - \\ & - \frac{E}{R} \cdot \frac{z_0^3}{3} - \frac{k}{R^m \cdot (m+2)} \cdot \frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} + \frac{k \cdot z_0^{m+2}}{R^m \cdot (m+2)} + \frac{4 \cdot z_0^3}{s^3} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot z_0}{R \cdot 3} + \\ & + \frac{4 \cdot z_0^3}{s^3} \cdot \frac{2 \cdot k}{R^m \cdot (m+2)} \cdot \frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} - \frac{4 \cdot z_0^3}{s^3} \cdot \frac{k \cdot z_0^{m+2}}{(m+2) \cdot R^m} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, сумма моментов остаточных напряжений по толщине обечайки также равна нулю, что подтверждает достоверность полученных зависимостей (6) и (7).

Для нахождения местоположения максимальных остаточных напряжений по толщине обечайки выполняем поиск экстремума $\sigma_{ост}$ по координате z :

$$\frac{\partial \sigma_{ост}}{\partial z} = k \cdot m \cdot \frac{z^{m-1}}{R^m} - 12 \cdot \frac{M}{s^3} = 0. \quad (10)$$

Из уравнения (10) получаем координату максимальных остаточных напряжений:

$$z^{m-1} = 12 \cdot \frac{R^m \cdot M}{k \cdot m \cdot s^3}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 z &= \left(12 \cdot \frac{R^m \cdot M}{k \cdot m \cdot s^3} \right)^{\frac{1}{m-1}} = \\
 &= \left(12 \cdot \frac{R^m}{k \cdot m \cdot s^3} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot z_0^3}{R \cdot 3} + 12 \cdot \frac{R^m}{k \cdot m \cdot s^3} \cdot \frac{2 \cdot k}{R^m \cdot (m+2)} \cdot \left(\frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} - z_0^{m+2} \right) \right)^{\frac{1}{m-1}} = \\
 &= \left[8 \cdot \frac{E \cdot R^{m-1}}{k \cdot m} \cdot \frac{z_0^3}{s^3} + \frac{24}{m \cdot (m+2) \cdot s^3} \cdot \left(\frac{s^{m+2}}{2^{m+2}} - z_0^{m+2} \right) \right]^{\frac{1}{m-1}}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

По полученной методике расчета нами разработана программа для расчета остаточных напряжений в металле после пластического изгиба. В программе предусмотрено построение эпюр остаточных напряжений для более наглядного изображения характера распределения напряжений по толщине обечайки [5].

Для упрощения пользования полученными аналитическими зависимостями, используя выражения (12) и (7), были найдены зависимости влияния толщины стенки s и радиусагиба R обечайки на величину остаточных напряжений, возникающих на внутренней поверхности обечайки. Расчет выполнен для наиболее распространенных в нефтехимическом аппарато-строении марок сталей. Результаты расчета для сталей с толщиной стенки 12 мм представлены на рисунке 2.

Для данных зависимостей найдена аппроксимирующая функция с высокой степенью достоверности, которая описывается уравнением

$$\sigma_{\text{ост}} = A \cdot (R/S) + B, \text{ МПа}, \quad (14)$$

где A и B – коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от толщины стенки S и радиусагиба R .

Дальнейшие расчеты позволили найти значения коэффициентов для различных диапазонов R/S , которые приведены в таблице 1.

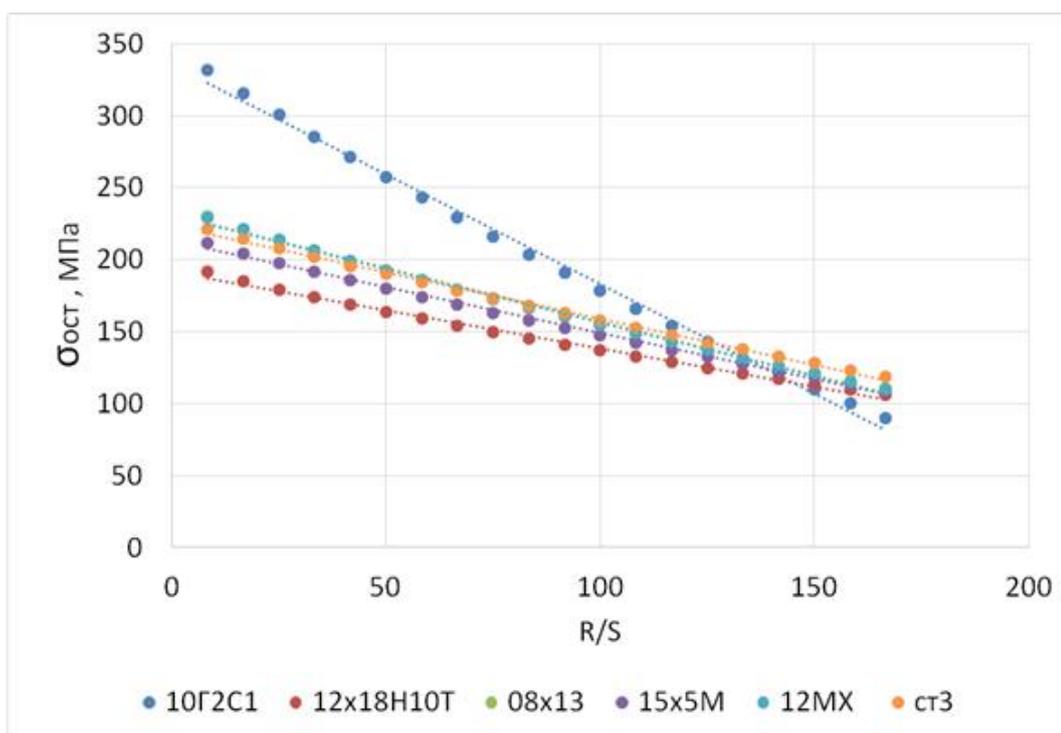


Рисунок 2. Влияние толщины и радиуса гиба на изменения величины остаточных напряжений на внутренней поверхности обечайки

Таблица 1. Значения коэффициентов *A* и *p*

Коэфф.	Марка стали					
	10Г2С1	08Х13	12Х18Н10Т	15Х5М	12МХ	Ст3
<i>A</i>	-0,127	-0,7446	-0,0441	-0,0531	-0,0621	-0,0534
<i>B</i>	335,28	231,08	191,36	212,66	230,87	222,97

Выводы

На основе теоретических исследований предложен расчетный метод оценки остаточных напряжений, возникающих при изготовлении цилиндрических обечаек пластическим изгибом листовых заготовок, для случая чистого упругопластического изгиба с учетом нелинейного упрочнения металла. Данный метод позволяет получить более точные результаты по оценке остаточных напряжений в обечайке по сравнению с методами расчета без учета упрочнения деформируемого металла и с учетом линейного упрочнения.

Получены зависимости величины остаточных напряжений на внутренней поверхности обечайки, возникающие при гибке листовой заготовки, от

толщины её стенки и радиусагиба, с учетом нелинейного деформационного упрочнения металла. Аппроксимация расчетной зависимости позволила установить коэффициенты для определения остаточных напряжений на поверхности обечайки для наиболее распространенных в нефтехимическом аппаратостроении сталей.

Список используемых источников

1. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М.: Машиностроение, 1966. 236 с.
2. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчёты методом расчленения тела. М.: Машгиз, 1963. 355 с.
3. Берлинер Ю.И., Балашов Ю.А. Технология химического и нефтяного аппаратостроения. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.
5. Файрушин А.М. Совершенствование технологического процесса изготовления корпусов аппаратов с применением вибрационной обработки: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. 121 с.

References

1. Lysov M.I. *Teoriya i raschet protsessov izgotovleniya detalei metodami gibki* [Theory and Calculation of Processes for Manufacturing Parts by Bending Methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 236 p. [in Russian].
2. Abramov V.V. *Ostatochnye napryazheniya i deformatsii v metallakh. Raschety metodom raschleneniya tela* [Residual Stresses and Strains in Metals. Body Dismemberment Calculations]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 355 p. [in Russian].
3. Berliner Yu.I., Balashov Yu.A. *Tekhnologiya khimicheskogo i neftyanogo apparatostroeniya* [Chemical and Petroleum Engineering Technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 256 p. [in Russian].

4. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied Theory of Plasticity and Creep]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 400 p. [in Russian].

5. Fairushin A.M. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya korpusov apparatov s primeneniem vibratsionnoi obrabotki: dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of the Technological Process of Manufacturing Apparatus Cases Using Vibration Processing: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2003. 121 p. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Файрушин Айрат Миннуллович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Airat M. Fairushin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Equipment and Technologies for Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: otsk@rusoil.net

Маркелов Дмитрий Алексеевич, студент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Dmitriy A. Markelov, Student of Equipment and Technologies for Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: markelovdima@inbox.ru

Марченко Илья Алексеевич, студент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ilya A. Marchenko, Student of Equipment and Technologies for Welding and Control Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ilya_marchenko_1976@mail.ru