

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ РЕМОНТЕ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ РУЛОНИРОВАНИЯ

© 2012 В.К. Тянь<sup>1</sup>, П.А. Комаров<sup>2</sup>, О.В. Худяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Самарагипротрубопровод»

Поступила в редакцию 12.03.2012

В работе описывается математическое моделирование процесса возникновения «хлопунов» в стенке ремонтируемого рулонизируемого резервуара вертикального стального для хранения нефти и нефтепродуктов. «Хлопуны» в стенке резервуара возникают при устранении таких дефектов как угловатость, недопустимое отклонение образующих стенки от вертикали, вмятины, устранение непроектных конструктивных элементов методом замены участка стенки вальцованными под проектный радиус резервуара листами, не имеющими внутренних напряжений.

Ключевые слова: *резервуар, угловатость, «хлопун», вмятина, дефект*

В 1945 году в СССР был сварен резервуар объемом 10000 м<sup>3</sup>. Инженер Института электросварки им. Патона Г.В. Раевский предложил изготавливать отдельные части (стенки, крыши, днища) крупных резервуаров в цехах с помощью автоматической сварки в виде больших полотнищ. Полотнище сворачивают в рулон и доставляют на площадку. На площадке рулон с полотнищем стенки разворачивается до проектного радиуса, и завариваются только монтажные стыки. В послевоенные годы эта индустриальная технология изготовления нефтехранилищ методом рулонирования сыграла большую роль в восстановлении народного хозяйства. В связи с тем, что Российское резервуаростроение неуклонно продолжает начатый путь индустриального изготовления, большая часть имеющегося резервуарного парка РФ состоит из рулонных резервуаров. Возраст многих резервуаров достигает 30 лет, что косвенно подтверждает надёжность принятого индустриального метода возведения металлоконструкций. Для поддержания эффективной и прежде всего безопасной эксплуатации резервуаров как опасных объектов, резервуары подвергаются технической диагностике. Техническая диагностика выявляет дефекты, влияющие на безопасную работу резервуаров. По результатам технической диагностики резервуары ремонтируют и осуществляют техническое перевооружение.

Основными дефектами стенок резервуаров, возведенных при помощи индустриального метода, являются угловатости монтажных швов, недопустимые отклонения образующих стенки от вертикали, хлопун, вмятины, непроектные

конструктивные элементы. Терминология вышеперечисленных дефектов принята в соответствии с п. 3 [1]. Все перечисленные дефекты устраняются методом вырезки дефектного участка и вставки новых вальцованных под проектный радиус (радиус резервуара) вставок. Авторы настоящей статьи имеют многочисленный опыт проектирования ремонтов резервуаров различной ёмкости. Накопленный опыт позволяет сделать некоторые выводы. При устранении вышеперечисленных дефектов методом вставок на месте вставок образуются хлопун. Таким образом, при устранении одного дефекта возникает другой дефект, и резервуар не может быть сдан в эксплуатацию.

**Цель работы:** выявить физические предпосылки возникновения хлопун и выполнить математическое моделирование данного дефекта при помощи МКЭ в ANSYS.

Основная идея метода индустриального изготовления резервуарных конструкций состоит в том, что стенка резервуара сваривается на заводе-изготовителе в виде плоского полотнища. Готовые полотнища на установках для рулонирования сворачиваются в рулон (рис. 1). Рулоны доставляются на площадку. В процессе сворачивания полотнище, изначально плоское, подвергается изгибу. Изгиб полотнища при сворачивании можно рассматривать с достаточной степенью точности как чистый изгиб стержня из идеально упругопластического материала с сохранением гипотезы плоских сечений при упругопластическом изгибе.

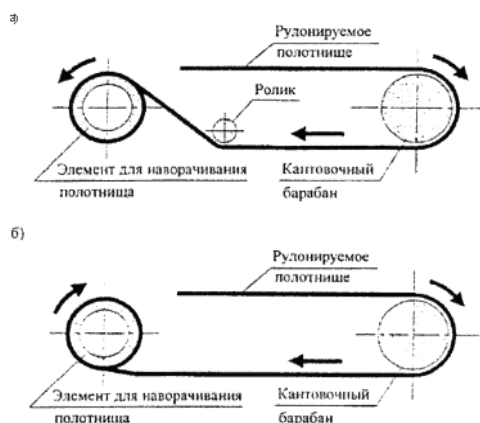
Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полотнища в процессе рулонирования. При сворачивании полотнища в рулон относительная деформация крайних волокон определяется радиусом изгиба. Радиус изгиба полотнища определяется радиусом барабана, на который наматывается полотнище. Радиус барабана

*Тянь Владимир Константинович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт». E-mail: tt@samgtu.ru*

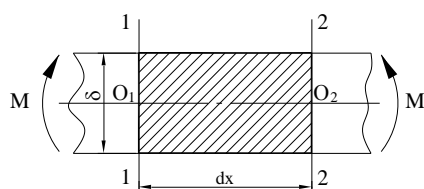
*Комаров Павел Андреевич, аспирант*

*Худяков Олег Владимирович, ведущий инженер*

на заводах-изготовителях, как правило, равен 1330 мм [2]. Рассмотрим участок полотна, подвергнутого сворачиванию. Процесс сворачивания полотна в рулон будем рассматривать как чистый изгиб (рис. 2).



**Рис. 1.** Схема установки с верхним сворачиванием (а) и схема установки с нижним сворачиванием (б)



**Рис. 2.** Участок полотна, подвергаемый сворачиванию:

1-1, 2-2 – бесконечно близкие друг к другу сечения,  $O_1O_2$  – отрезок, принадлежащий нейтральному слою,  $\delta$  – толщина полотна,  $M$  – изгибающий момент

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полотна, свнутого в рулон радиуса  $R_{ce}$  (рис. 3). Для простоты примем толщину полотна постоянной ( $\delta$ ):  $d\alpha$  – угол между бесконечно близкими сечениями 1-1 и 2-2 свёрнутого в рулон полотна,  $z$  – расстояние от нейтрального слоя до рассматриваемого волокна,  $AB$  – удлиненное волокно при изгибе. Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned} O_1O_2 &= dx = \rho d\alpha, \\ AB &= (R_{ce} + z)d\alpha. \end{aligned}$$

Абсолютное удлинение волокна:

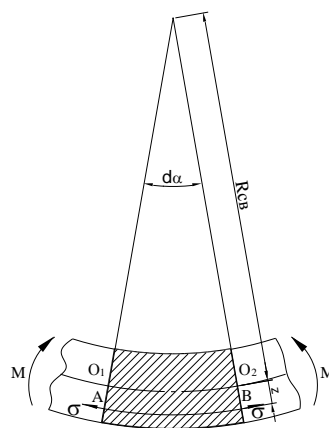
$$\Delta l = (R_{ce} + z)d\alpha - R_{ce}d\alpha = zd\alpha.$$

Относительное удлинение волокна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{zd\alpha}{R_{ce}d\alpha} = \frac{z}{R_{ce}}. \quad (1)$$

Следовательно, относительная деформация крайних волокон полотна при сворачивании равна:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{2R_{ce}}. \quad (2)$$



**Рис. 3.** Участок полотна, свёрнутый в рулон радиуса  $\rho$

Напряжение по толщине полотна распределяются по линейному закону:

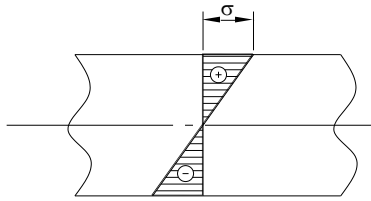
$$\sigma = E\varepsilon = \frac{Ez}{R_{ce}}. \quad (3)$$

Рулонируемые стали, как правило, имеют ярко выраженную площадку текучести, поэтому напряжения в полотнище будут иметь эпюры, изображённые на рис. 4 и рис. 5 (верхние волокна на рисунке растянуты, значение эпюр положительное, нижние – сжаты, значение эпюр отрицательное). Предельное значение для упругих деформаций равно:

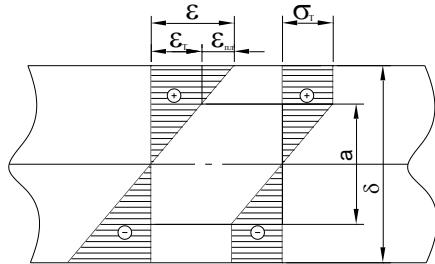
$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) видно, что в зависимости от толщины листа полотна при сворачивании в рулон лист может изгибаться упруго и не претерпевать остаточных деформаций (см. рис. 4). В то же время в листах с большей толщиной относительная деформация крайних волокон может превысить предельное значение упругой деформации и наряду с упругими будут иметь место остаточные пластические деформации (см. рис. 5). Т.е. при данном радиусе сворачивания с увеличением толщины листа полотна зона распространения пластических деформаций будет увеличиваться, в то время как зона упругих деформаций останется без изменения. Следовательно, для данного радиуса сворачивания и данного материала можно определить границу для толщин полотен, меньше которой листы будут сворачиваться упруго.

$$a = \frac{2\sigma_T R_{ce}}{E}. \quad (5)$$



**Рис. 4.** Эпюра напряжений в полотнище, не превышающих предела текучести материала



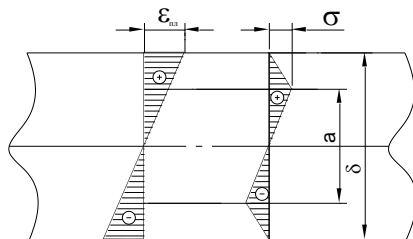
**Рис. 5.** Эпюры напряжений и относительных деформаций в полотнище, превышающих предел текучести материала

После освобождения полотнища из свёрнутого состояния тонкие листы, толщина которых не превышает величины упругой зоны (а), распрямятся. Толстые листы, в крайних волокнах которых появилась фибровая текучесть, распрямятся незначительно и будут иметь следующий остаточный радиус кривизны [5]

$$R_{ocm} = \frac{2R_{ce}}{k^3 - 3k + 2}, \quad (6)$$

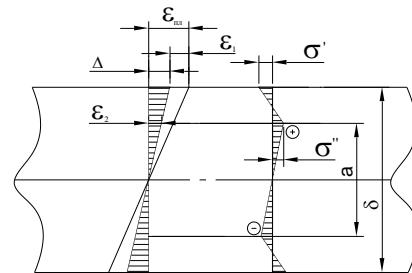
где  $k = \frac{a}{\delta} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon}$  – доля упругой зоны во всей толщине листа.

Освобождение полотнища происходит вследствие того, что изгибающий момент, посредством которого листы были свёрнуты, снимается, и напряжения, накопленные в листе для уравнивания приложенного момента, разворачивают рулон до состояния равновесия. При разгибе полотнища от  $R_{ce}$  до  $R_{ocm}$  напряжённо-деформированное состояние листов пройдёт через некоторое промежуточное положение, когда упругие деформации крайних волокон будут исчерпаны ( $\varepsilon_T=0$ ), а останутся только пластические (остаточные) деформации  $\varepsilon_{пл}$ . В этом случае напряжения в крайних волокнах будут равны нулю (рис. 6).



**Рис. 6.** Эпюры напряжённо-деформированного промежуточного состояния листа рулона при разгибе полотнища

Но листы благодаря силам упругих напряжений в упругой зоне (а) будут продолжать разгибаться. При этом крайние наружные волокна начнут сжиматься (крайние внутренние, соответственно, растягиваться), что вызовет напряжение сжатия (растяжения)  $\sigma_{ocm}$ . Когда площади эпюр сжатия и растяжения будут уравновешены относительно нейтральной оси, выпрямление полосы прекратится (рис. 7). При достижении состояния равновесия в рулоне крайние наружные волокна сожмутся на величину  $\varepsilon_1$ , внутренние растянутся на ту же величину. Рулон развернется до некоторого остаточного радиуса  $R_{ocm}$ . В крайних волокнах относительная деформация будет иметь значение  $\Delta = \varepsilon_{пл} - \varepsilon_1$ . Упругая деформация на границе упругой зоны (а) будет иметь значение  $\varepsilon_2$ .



**Рис. 7.** Эпюры напряжённо-деформированного состояния полотнища после освобождения полотнища из свёрнутого состояния

Напряжения в этих местах соответственно равны:

$$\sigma'_{ocm} = E\varepsilon_1, \quad (7)$$

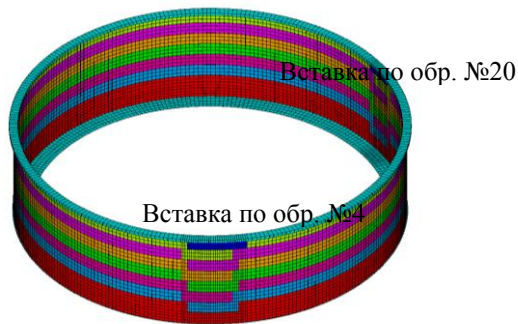
$$\sigma''_{ocm} = E\varepsilon_2. \quad (8)$$

В связи с тем, что  $R_{ocm}$  рулона меньше радиуса резервуара, рулон будет принудительно разворачивать до проектного радиуса резервуара  $R_{пр}$ . В соответствии с рис. 7 остаточные напряжения в крайних волокнах будут увеличиваться, а в упругой зоне – уменьшаться. Напряжения в таком случае будут равны:

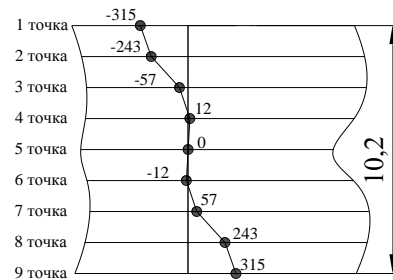
$$\sigma'_{ocm} = \frac{\sigma_T}{k} \left( 1 - k - \frac{R_{ce}}{R_{пр}} \right), \quad (9)$$

$$\sigma''_{ocm} = \sigma_T \frac{R_{ce}}{R_{пр}}. \quad (10)$$

При помощи MathCad для стенки резервуара РВС-20000 в полотнище было вычислено остаточное напряжённое состояние стенки, развёрнутой на проектный радиус (22,8 м). Материал стенки – сталь 09Г2С с пределом текучести 315 МПа. При создании модели стенки принято, что вальцованные ремонтные вставки в стенке резервуара не имеют остаточных напряжений. В ANSYS для создания модели принят тип конечного элемента – SHELL181, в месте опирания днища резервуара на основание реализована контактная задача – элементы CONTA173, TARGET170, опорное кольцо – балочный элемент BEAM4 (рис. 8).



**Рис. 8.** Конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 №39 с ремонтными вставками по двум образующим и заменённым 1-м поясом



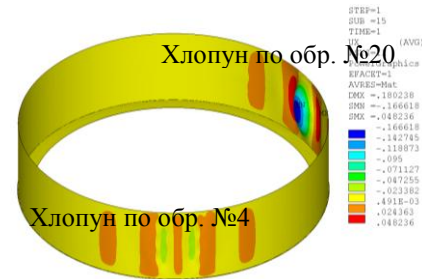
**Рис. 9.** Напряжённое состояние во 2-м поясе резервуара, заданное в интеграционных точках по толщине пояса в МПа

Для создания эпюры остаточных напряжений, остающихся в стенке резервуара, развёрнутой из рулона до проектного радиуса  $R_{пр}$  (22,8 м), использовались команды ANSYS:

- SECTYPE – команда определяет тип сечения элемента, в данном случае shell, т.е. оболочка;
- SECDATA – команда определяет геометрические характеристики сечения: толщину, номер материала, количество интеграционных точек в слое;
- INISTATE – команда определяет начальные параметры в элементе в интеграционной точке по сечению, в нашем случае это остаточные напряжения.

Например, для второго пояса с толщиной 10,2 мм эпюра остаточных напряжений будет выглядеть для девяти интеграционных точек в соответствии с рис. 9. Решение вышеописанной модели стенки резервуара показало возникновение хлопунгов по ремонтным вставкам (рис. 10).

**Выводы:** конечно-элементная модель стенки рулонизируемого резервуара вполне корректно отражает напряжённо-деформированное состояние стенки и позволяет на качественном уровне прогнозировать появление хлопунгов. Полученные результаты анализа позволяют предложить технические мероприятия, исключающие возникновение хлопунгов при ремонте резервуара.



**Рис. 10.** Эпюра радиальных перемещений стенки резервуара

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. РД-23.020.00-КТН-296-07 «Руководство по оценке технического состояния резервуаров»
2. ПБ 03-605-03 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов»
3. РД-23.020.00-КТН-283-09 «Правила ремонта и реконструкции резервуаров для хранения нефти объёмом 1000 – 50000 куб. м»
4. Каплун, А.Б. «ANSYS в руках инженера» / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М., 2003. 272 с.
5. Николаев, Н.В. Стальные вертикальные резервуары низкого давления для нефти и нефтепродуктов / Н.В. Николаев, В.А. Иванов, В.В. Новосёлов. Учебник. – СПб, ООО «Центр «Литнефтегаз», 2006. 335 с.

## SYSTEMS ANALYSIS AND THE BEHAVIOUR FORECAST OF METAL CONSTRUCTIONS AT REPAIR THE STEEL TANKS, MADE BY THE METHOD OF ROLLING

© 2012 V.K.Tyan<sup>1</sup>, P.A. Komarov<sup>2</sup>, O.V. Khudyakov<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Samara State Technical University  
<sup>2</sup>JSC “Samaragiprotruboprovod”

In work the mathematical modeling of slam crack occurrence process in wall of repaired vertical steel rolling tank for storage the oil and oil products is described. Slam cracks in a tank wall arise at elimination of such defects as angularity, inadmissible deviation of walls forming from vertical, dents, elimination of not design constructive elements by a method of replacement of the part of a wall by sheets, flared to design radius of the tank, which do not have internal stresses.

Key words: tank, angularity, slam crack, dent, defect

Vladimir Tyan, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department “Pipeline Transport”.  
 E-mail: tt@samgtu.ru; Pavel Komarov, Post-graduate Student; Oleg Khudyakov, Leading Engineer