

характеризующие изменение формы трещины, выходят на единую кривую, независимую от вида дефекта и материала. Первоначальная форма зародившейся трещины (до слияния с единой кривой) зависит от вида дефекта, его формы, состояния поверхностного слоя рабочей части образцов.

Таким образом, полученные результаты показали, что местоположение очага зарождения усталостных трещин определяется формой дефекта, его происхождением, а также состоянием поверхностного слоя образца. Технологические остаточные напряжения сжатия приводят при кручении к более раннему появлению трещин возле дефектов, однако эти же напряжения снижают скорость распространения трещины, превращая их в нераспространяющиеся. То есть, остаточные напряжения сжатия повышают сопротивление металлов усталости в результате торможения развития трещин. Форма усталостной трещины на начальной стадии зависит от природы и геометрии дефекта, а также состояния поверхностного слоя образца. При дальнейшем росте как при изгибе, так и при кручении все графики, характеризующие изменение формы трещины ложатся на единую кривую.

Литература

1. Hills D.A. Some aspects of post - yield contact problems// Wear. - 1983. -85, № 1. -P. 107-119.
2. Прочностные характеристики слоев, полученных электроискровым легированием сталей тугоплавкими металлами/ Г.С. Писаренко, Г.В. Самсонов, А.Д.Веркотуров и др.// Пробл. прочности. - 1973. -№ 2. -С. 106-111.
3. Смагленко Ф.П., Лошак М.Г. Установка для определения остаточных напряжений в твердых сплавах// Пробл. прочности. -1974. -№ 3. -с. 32-35.
4. Murakami Y., Endo M. A geometrical parameter for the quantitative estimation of the effects of small defects on fatigue strength of metals // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. -1983. -A49, № 438. -P. 127-136.
5. Pierce W.S., Shennon J.L. Fatigue using an inexpensive resonant fatiguins apparatus// J. Test. Eval. -1978. -6. № 3. -P. 183-188.

РАБОТА И РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПИРАЛЬНОНАВИВНЫХ СИЛОСОВ

Н. Н. Мурашко

1. Особенности конструктивного решения

Хотя наиболее простыми при изготовлении и монтаже являются бескаркасные силосы из-за их гладких стенок, спиральнонавивные силосы, навиваемые по системе "Lipp", получили широкое

распространение в странах СНГ и республике Беларусь. Это объясняется тем, что основным недостатком гладких стенок силосов является их сравнительно высокая металлоемкость, вызванная малой устойчивостью тонкостенных цилиндрических оболочек, испытывающих воздействие сжимающих нагрузок в продольном и кольцевом направлениях соответственно от вертикального давления кровли и сыпучего заполнителя, трущегося о стенку, а также от радиального давления ветра. Правда, для увеличения жесткости, повышения тонкостенности и в целях снижения металлоемкости бескаркасных рулонизируемых силосов цилиндрические стенки подкрепляются системой ребер в продольном и кольцевом направлении. Вертикальные ребра (стрингера) могут встречаться с кольцевыми ребрами (шпангоутами), располагаясь при этом с произвольным, обычно регулярным шагом. Ребра могут находиться как снаружи, так и внутри оболочки и иметь различное поперечное сечение (прямоугольное, уголковое или зетовое) При этом ребра могут прикрепляться к стенке с помощью сварки, пайки, болтов или образовываться путем вальцовки или дутья [1].

Следует отметить, что характерной особенностью для спиральнонавивных силосов, как и для гладкостенных цилиндрических оболочек постоянного или переменного по высоте сечения, является также установка подкрепляющих стоек с внутренней стороны силоса на сварке, или с наружной стороны на болтах [2]. Конструктивное решение подкрепления оболочки навиваемых силосов с наружной стороны на болтах способствует сохранности антикоррозионного покрытия стен и менее трудоемко по сравнению с приваркой стоек внутри силоса. Для экономии металла и снижения трудоемкости возведения силосов спиральнонавивного типа в последнее время все большее применение находит стендовый способ навивки силосов с последующим их монтажем.

Установка вертикальных стоек с определенным шагом в спиральнонавивных силосах определяется недостаточной жесткостью их стенок в вертикальном направлении. При этом стойки размещаются, как правило, в нижней части оболочки силоса и не доводятся до верхней кромки стенки. В этих условиях внутренние вертикальные стойки силосов являются концентраторами напряжений, что может способствовать потере устойчивости листа стенки между сварными швами в зоне над стойками.

Металлические зернохранилища спиральнонавивного типа отличаются высокой эффективностью, обеспеченная небольшими трудозатратами при строительстве, ремонте и эксплуатации. Целесообразность использования метода навивки, определяется наименьшей трудоемкостью по сравнению с другими способами возведения силосов. Невысокая собственная масса стен по отношению к массе хранимого продукта и меньшая по сравнению с железобетонными силосами

нагрузка на фундамент приводят к снижению удельной стоимости 1т хранимого продукта.

В металлических механизированных зернохранилищах спиральнонавивного типа обеспечивается высокая герметичность. Причем навивочные машины могут использоваться также при возведении емкостей для жидкостей и других сыпучих материалов с очень мелкими фракциями. Диаметр строящихся силосов - 6, 7, 9, 12, 15 и 18 м. Такие емкости легко привязываются к действующим элеваторам и являются средством оперативного хранения зерна и другой сельскохозяйственной продукции непосредственно в местах сбора урожая.

Для возведения спиральнонавивных силосов фирмой "Lipp" используется горячекатанная стальная лента шириной 495 мм и толщиной 2-4 мм. В странах СНГ признано целесообразным строительство спиральнонавивных силосов из стальных плит с применением специальной стали с повышенными пластическими характеристиками, а также из алюминиевых сплавов. Лента непрерывно навивается по спирали и соединяется по винтовой линии с образованием одиночных или двойных фальцевых ребер высотой 25-30 мм [2]. Винтовые фальцевые ребра в силу малости их угла подъема (около 1°) могут рассматриваться в качестве кольцевых ребер слоистой структуры с весьма малым шагом - порядка 360-370 мм. (Например, при диаметре силоса порядка 10 м ($d \approx 10$ м) шаг подъема составляет $l_1 = 365$ мм.

Опыт возведения и эксплуатации спиральнонавивных силосов в странах СНГ показывает, что уязвимым местом конструкции стен является устройство спирального фальца. Неудачно изготовленный фалец в процессе эксплуатации силоса под влиянием внутреннего давления сыпучей массы имеет тенденцию раскрываться вследствие возникновения местных пластических деформаций. Имеют место случаи, когда стенки с фальцевым стыком после года эксплуатации спиральнонавивного силоса перестали удовлетворять даже условию ее герметичности. Поэтому обеспечению плотности (герметичности) фальцевого стыка и его усилению уделяется особое внимание.

Повышение плотности фальцевого стыка достигается введением дополнительных прутковых элементов с небольшим предварительным напряжением. Они располагаются на наружной стороне стенки и примыкающих с одной или с двух сторон фальца, а также внутри фальцевого стыка [2]. Диаметр уплотняющего элемента принимается в 2-3 раза большим, чем толщина ленты. Он препятствует разуплотнению фальца и повышает его жесткость при угловой девиации. Вследствие постановки усиливающих элементов уменьшается свободная длина обечайки l_0 , или расстояние между точками перегиба стенки в момент потери ее устойчивости. То есть уменьшается область действия

реактивного отпора сыпучего материала и тем самым возрастает устойчивость оболочки силоса [3].

2. Особенности расчетной схемы и расчета

Специфика конструктивного решения спиральнонавивного силоса характеризуется работой тонкой цилиндрической оболочки, кольцевые фальцевые ребра которой не только повышают жесткость стенки на растяжение, сжатие и изгиб в кольцевом направлении, но и одновременно снижает жесткость вдоль образующей. Малый шаг ребер вызывает возмущение безмоментного напряженного состояния и появление существенных продольных изгибающих моментов не имеющих характера затухания краевого эффекта.

Кольцевой фалец обеспечивает эксцентричную передачу осевого продольного усилия, что приводит к появлению дополнительного изгибающего меридионального момента, вызывающего местнорадиальное деформирование стенки между фальцами (рис.1а) За счет фальцев металлоемкость конструкции повышается на 10-15%. Кроме того ухудшается работа стенки при действии вертикальной сжимающей нагрузки. Характерной особенностью оболочки спиральнонавивного силоса является ее значительная тонкостенность, то есть $r/t = 1000 \div 4500$, что приводит к необходимости расчета стенки на прочность и устойчивость. В действительности толщина стенки цилиндрической оболочки силоса определяется не из соображений прочности, а ее устойчивости и главным образом от действия вертикальной сжимающей нагрузки. То есть основной задачей расчета является проверка устойчивости стенки, которая связана с определением величин и вертикального давления, создаваемого силами трения зерна о стенку силоса при его истечении и учет совместной работы стенки и сыпучего материала. Устойчивость стенок навивных металлических силосов проверяется по известным рекомендациям симпозиума лицензистов "Lipp" 1979.

Расчет стенки силоса следует производить по деформированной схеме, так как применение приближенной инженерной методики в геометрически линейной постановке, в том числе и при расчете на прочность, не отражает реальной работы конструкции стенки и не идет в запас прочности, так как не учитывает дополнительных изгибающих моментов, вызванных геометрически нелинейным характером деформирования оболочки силоса. Наличие начальных несовершенств - радиальной погиби в межфальцевой зоне - также приводит к снижению несущей способности стенки как по устойчивости, так и по прочности [4].

Специфическим воздействием на стенки металлических силосов является реактивный односторонний отпор сыпучего материала при деформации стенки внутрь силоса (рис. 1б). В сочетании с внутренним давлением этот фактор оказывает стабилизирующее влияние на

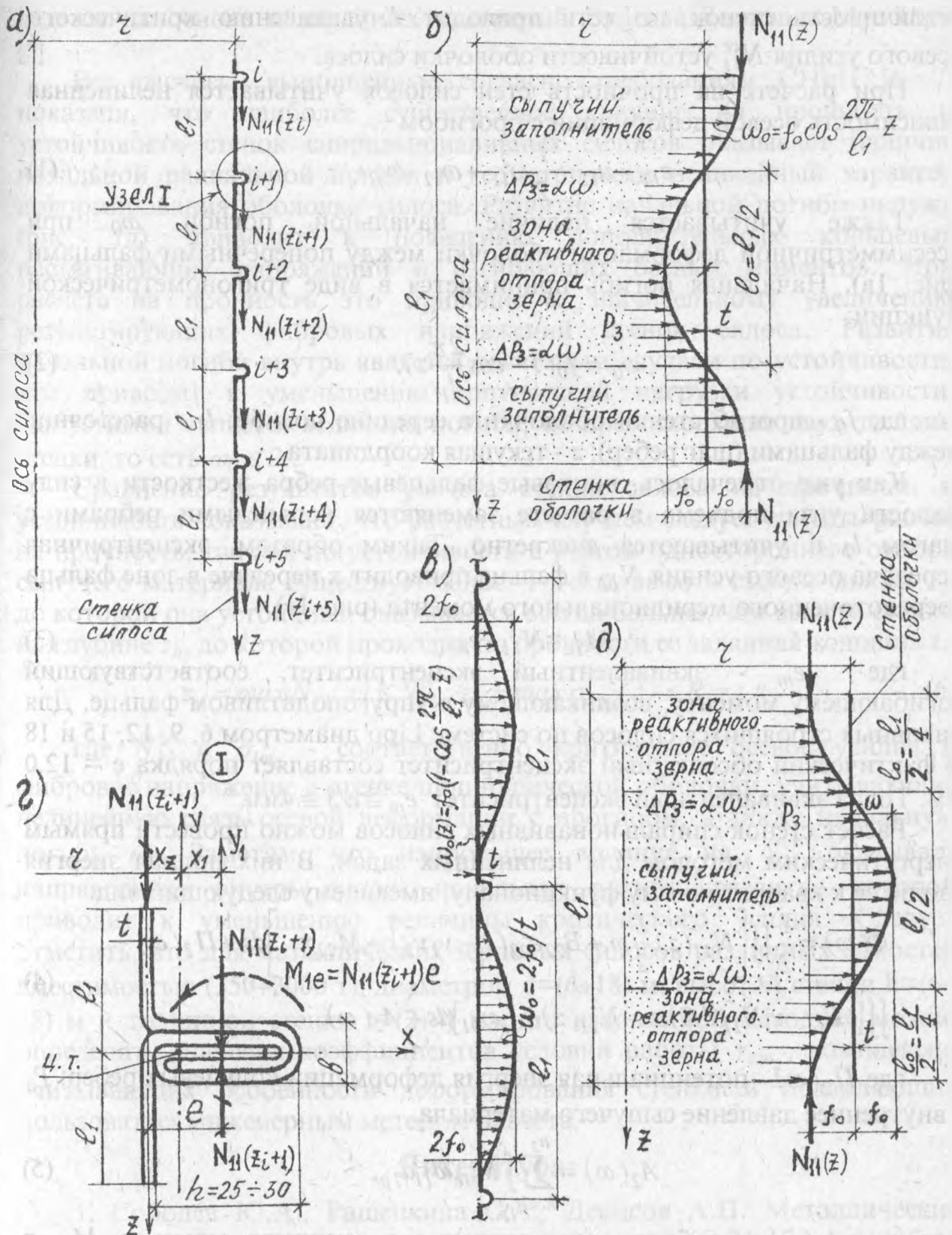


Рис. I. К расчету оболочки спиральнонавивного силоса по деформированной схеме: а-расчетная схема стенки; б-схема при расчете на устойчивость с учетом реактивного отпора зерна и начальной погиби внутрь силоса; в-эксцентричная передача осевого усилия в фальце; г-учет начальных несовершенств; д-схема при расчете на прочность с учетом начальной погиби наружу силоса

устойчивость стенок, то есть приводит к увеличению критического осевого усилия N_{11}^{cr} устойчивости оболочки силоса.

При расчете на прочность стен силосов учитывается нелинейная зависимость осевой деформации с прогибом

$$\varepsilon_{11} = u_{11} + \frac{1}{2} \omega_{11}^2 + \omega_{11} \cdot \omega_{01} \quad (1)$$

Также учитывается наличие начальной погиби ω_0 при осесимметричной деформации оболочки между поперечными фальцами (рис. 1в). Начальная погибь принимается в виде тригонометрической функции:

$$\omega_0 = f_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{l_1} z \right), \quad (2)$$

где f_0 - прогиб стенки оболочки в середине погиби; l_1 - расстояние между фальцами (шаг ребер); z - текущая координата.

Как уже отмечалось, винтовые фальцевые ребра жесткости в силу малости угла подъема в расчете заменяются кольцевыми ребрами с шагом l_1 и учитываются дискретно. Таким образом, эксцентричная передача осевого усилия N_{11} в фальце приводит к передаче в зоне фальца сосредоточенного меридионального момента (рис. 1г).

$$M_{1e} = N_{11} \cdot e_m, \quad (3)$$

где e_m - эквивалентный эксцентриситет, соответствующий изгибающему моменту, возникающему в упругоподатливом фальце. Для навивных строящихся силосов по системе Lipp диаметром 6, 9, 12, 15 и 18 м фактический абсолютный эксцентриситет составляет порядка $e = 12,0$ мм. Тогда эквивалентный эксцентриситет $e_m \cong e/3 \cong 4$ мм.

Расчет стенок спиральнонавивных силосов можно провести прямым энергетическим методом для нелинейных задач. В них полная энергия сводится к квадратичному функционалу, имеющему следующий вид:

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{2} \iint_s \left[N_{11}(z) \frac{1}{2} \omega + B_{22} \varepsilon_{22}^2 (1 - \nu_1 \nu_2) + M_{11} \chi_{11} \right] ds + \Pi_2(\omega) - \quad (4)$$

$$\iint_s [(P_3 - \nu_1 N_{11} / 2) \omega - N_{11}(z) \omega_{11} \omega_{01}] ds - A_2(\omega),$$

где $\Pi_2(\omega)$ - потенциальная энергия деформации кольцевых ребер; P_3 - внутреннее давление сыпучего материала.

$$A_2(\omega) = \sum_{k=1}^{n_2} \int M_{1e} \omega_{11} d_{1p}, \quad (5)$$

где $A_2(\omega)$ - работа сосредоточенного внешнего момента M_{1e} в кольцевом ребре. Расчет стенки оболочки между фальцами на местную устойчивость и определение ее докритического напряженного состояния при одностороннем взаимодействии ее с сыпучим материалом (рис. 1б)

ведется на основе нелинейных уравнений Власова-Доннелла-Муштари [5].

Все расчеты, выполненные согласно требованиям СНиП [6, 7] показали, что наиболее существенное влияние на прочность и устойчивость стенок спиральнонавивных силосов оказывает наличие начальной радиальной погиби и геометрически нелинейный характер деформирования оболочки силоса. Развитие начальной погиби наружу (рис. 1д) приводит к появлению дополнительных кольцевых растягивающих напряжений и изгибающих осевых моментов. При расчете на прочность это приводит к значительному увеличению результирующих фибровых напряжений стенок силоса. Развитие начальной погиби внутрь является расчетным случаем по устойчивости, что приводит к уменьшению критической нагрузки устойчивости. Допустимой является величина погиби, не превосходящая двух толщин стенки, то есть $\omega_0 \leq 2t$.

Сравнение результатов расчета стенки силоса на прочность и устойчивость показывает, что расчетным случаем следует считать расчет на прочность, так как по устойчивости с учетом одностороннего отпора сыпучего материала существует запас. То есть высота стенки силоса z_y , до которой она устойчива, оказывается всегда больше, чем высота стенки на глубине z_n , до которой проходит по прочности ее заданная толщина t :

$$z_y = \max N_{11}(z) \leq N_{11}^{cr}; \quad z_n = \max \sigma_{i\omega_0}(z) \leq R_y \gamma_c, \quad (6)$$

где N_{11}^{cr} и $\sigma_{i\omega_0}$ - соответственно критическое осевое усилие и фибровое напряжение в стенке цилиндрической оболочки, учитывающие нелинейную связь осевой деформации с прогибом, а также начальную погибь ω_0 . Заметим, что наибольшее влияние на N_{11}^{cr} оказывает направленная внутрь силоса начальная погибь, развитие которой приводит к уменьшению величины критического усилия. Следует отметить, что для металлических зерновых силосов различных емкостей вместимостью (350÷3000 т), диаметром $d=(6÷18)$ м, высотой стенки $h=(6÷18)$ м и толщиной стенки $t=(2÷4)$ мм. по изложенной методике можно определить значения коэффициентов условий работы $\gamma_{c\omega_0}$, комплексно учитывающих особенности деформирования стенки и позволяющих пользоваться инженерным методом расчета.

Литература:

1. Соболев Ю.А., Ращепкина С.А., Денисов А.П. Металлические силосы. Современное состояние и опыт строительства. Учебное пособие. СПИ, Саратов, 1988, 52с.
2. Мурашко Н.Н. Проектирование листовых металлических конструкций: Учебное пособие/ Брест. политех. ин-т -Брест, 1995. -97с.

3. Мурашко Н.Н., Соболев Ю.В., Ращепкина С.А., и др. Исследование работы тонкостенных металлических силосов. Материалы конференции "Проблемы проектирования легких стальных конструкций", БИСИ, Брест, 1989, с. 51-66.

4. Игудисман О.С. Рекомендации по применению в проектировании новых методов расчета тонкостенных металлических силосов, деформирующихся совместно с сыпучим материалом. ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР. М., 1988, 53с.

5. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике. Гостехиздат, М-Л., 1949, 784с.

6. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции /Госстрой СССР. - М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1988. -96с.

7. СНиП 2.10.05.-85. Предприятия, здания и сооружения по хранению и перевозке зерна /Госстрой СССР.-М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1985. -53с.

УСИЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ МАЗУТА

В. И. Драган, А. В. Мухин, И. В. Зинкевич, В. Н. Малиновский

В период эксплуатации здания и сооружения промышленных предприятий подвергаются многочисленным природным или технологическим воздействиям, в результате чего, изнашиваются и приходят в негодность или требуют ремонта. В последнее время из-за финансовых трудностей предпочтение отдаётся последнему. Хотя конструктивные решения зданий и их отдельных элементов идентичны, однако, пути восстановления несущей способности их различны и часто требуют индивидуальных решений. Особенно это касается при выполнении ремонтных работ инженерных сооружений.

В течении 18-ти лет на Брестском молочном комбинате эксплуатировался металлический резервуар для хранения нефти емкостью 400 м³. Диаметр резервуара 8,5 м, высота - 7,5 м. Изготовлен резервуар из листовой стали марки ВСтЗпсб методом рулонирования. Толщина листов стали стенки и днища по проекту составляла 4 мм. Соединение стенки и днища выполнено на сварке в тавр двумя угловыми швами с внутренней и внешней стороны. Стенка резервуара утеплена стекловатой и закрыта экраном из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм.

За период эксплуатации вследствие коррозионного поражения в стенке резервуара в непосредственной близости от днища образовались два отверстия через которые началась течка мазута. По мнению авторов основными причинами ускоренной коррозии стенки являются:

- застой воды в зоне сопряжения стенки и днища из-за отмоксти, устроенной выше днища резервуара;