

Моделирование напряженно-деформированного состояния миксера

• БЕЙГУЛ О.О., ТАБЕРКО Л.Н. *, КЛОЧКО Р.И., РЕЙДЕРМАН Ю.И.

Днепродзержинский государственный технический университет
*Днепропетровский технологическо-экономический техникум

В статье рассмотрены причины и природа разрушения сварных миксеров. Предложены схема и методика расчета возникающих напряжений, которые дают обоснование прочностных характеристик миксеров, а также позволяют повысить их надежность и гарантировать безопасность работы.

У статті розглянуті причини і природа руйнування зварних міксерів. Запропоновані схема та методика розрахунку виникаючих напруг, які дають обґрунтування характеристик міцності міксерів, а також дозволяють підвищити їх надійність і гарантувати безпеку роботи.

Reasons and nature of destruction of the welded mixers are considered in the article. There are offered chart and method of calculation of nascent tensions which give the ground of durability descriptions of mixers, and also allow to promote their reliability and guarantee safety of work.

Причиной разрушения сварных 2500-т миксеров может быть ухудшение пластических свойств в зоне сварки и повышение монолитности конструкции. Поэтому при расчете прочности следует учитывать податливость совместно работающих частей. Такая методика расчета нам не известна. Рассмотрим систему (рис. 1) из концентрически расположенных стальной цилиндрической оболочки 1, кольцевой футеровки 2 и зазора 3, заполненного набойкой. Радиальные, продольные и кольцевые швы в футеровке, заполненные листами толя, сгорающими при повышении температуры футеровки, частично компенсируют температурные расширения.

На оболочку кожуха миксера действуют собственный вес, вес жидкого чугуна и внутреннее давление, возникающее от распора футеровки, расширяющейся при нагреве как в радиальном, так и в продольном направлениях. Кроме того, в корпусе возникают напряжения, обусловленные перепадом температуры по толщине оболочки. Следуя принципу независимости действия сил, можно определить и просуммировать напряжение от различных силовых факторов.

$$\sigma_1^0 = \frac{\sigma_2^0}{2} \quad (1)$$

$$P_1 \pi r l = P_3 \pi \left(r_1 + \frac{x}{2} \right) \cdot l \quad (2)$$

Кольцевые и меридиональные напряжения в оболочке от распора футеровки определяется из условия статического равновесия системы равны [1, с. 31]

l — длина корпуса миксера; P_3 — величина сжимающего футеровку давления, равномерно распределенного по средней поверхности сжатой зоны футеровки толщиной X (рис. 1).

На поверхности футеровки, находящейся от продольной оси миксера расстоянии $L = r_1 + x$ и работающей только на сжатие.

$$\sigma_2^0 = - \frac{D_3 \cdot \left(r_1 + \frac{x}{2} \right)}{x} + \frac{E_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot (t_1 - t_2) \cdot x}{2 \cdot (1 - \mu_\delta) \cdot \delta_\delta} - \frac{(\tilde{N}_2 + \tilde{N}_1 \cdot \mu_\delta) \cdot A_\delta}{(1 - \mu_\delta^2)} = 0 \quad (3)$$

где T и S — соответственно кольцевое и меридиональное усилия (для рассматриваемого случая $S=0$); C_1, C_2 — относительная деформация в продольном и кольцевом направлениях вследствие выгорания листов толя

(она может проявляться свободно, без образования напряжений); Δt — градиент температуры по толщине футеровки; μ и μ_ϕ — коэффициент Пуассона кожуха и футеровки; R_1 и R_2 — главные радиусы кривизны; ϵ и ϵ_2 — относительные деформации в продольном и поперечном направлениях.

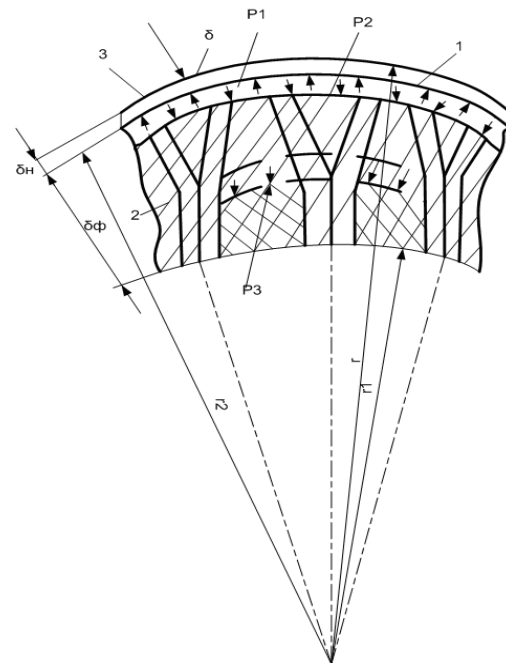


Рис. 1. Сечение стенки кожуха миксера

Из общих выражений безмоментной теории [1, с. 29] имеем:

$$\begin{aligned} \frac{S}{R_1} + \frac{T}{R_2} &= -Z; Z = P_3; \\ \epsilon_1 &= \frac{1}{E_\phi \cdot \delta_\phi} \cdot (S - \mu_\phi T) + \alpha_\phi \Delta t - C_2; \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E_\phi \cdot \delta_\phi} \cdot (S - \mu_\phi T) + \alpha_\phi \Delta t - C_1 \end{aligned} \quad (4)$$

α_ϕ — коэффициент температурного расширения футеровки. После соответствующих подстановок получим выражение.

Здесь:

$$\sigma_2^\delta = -\frac{D_3 \cdot (r_1 + \frac{x}{2})}{x} + \frac{E_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot (t_1 - t_2) \cdot x}{2 \cdot (1 - \mu_\delta) \cdot \delta_\delta}, \quad (5)$$

$$-\frac{(\tilde{N}_2 + \tilde{N}_1 \cdot \mu_\delta) \cdot \dot{A}_\delta}{(1 - \mu_\delta^2)} = 0$$

где Δ_p — приращение r_2 от давления P_1 действующего на оболочку; Δ_n — приращение r_2 за счет податливости набойки (в худшем случае $\Delta_n=0$); куда входят неизвестные P_1 и x . Чтобы определить их, составим уравнение неразрывности для поперечного сечения миксера радиуса:

$$\Delta_p - \Delta_c = \Delta_t + \Delta_\phi + \Delta_n$$

Δ_t — приращение r_2 при равномерном нагреве кожуха миксера; Δ_c и Δ_ϕ — приращение r_2 за счет свободной деформации в радиальном и в кольцевом направлениях, обусловленной нагревом футеровки до температуры $\frac{t_1 + t_2}{2}$; t_1 — температура внутренней поверхности

футеровки (температура чугуна); t_2 — температура наружной поверхности футеровки; t_3 — средняя температура оболочки (кожуха миксера).

Определив и подставив в выражение (2) входящие в него члены, получим

$$t_2 = t_1 - (t_1 - t_3) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\delta_i}{\delta_\delta}};$$

$$P_1 \cdot r \cdot r_2 \cdot \left(\frac{1}{\delta E} - \frac{1}{E_\delta \cdot \delta} - \right. \quad (6)$$

$$\left. - (\tilde{N}_2 \cdot r_2 + \Delta_c) = \right.$$

$$= (\alpha \cdot t_3 + \alpha_\delta \cdot \frac{t_1 + t_2}{2}) \cdot r_2 -$$

$$\left. - \alpha_\delta \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \cdot r_2 + \Delta_i \right.$$

При учете изменения температуры $\Delta t_1 = 20^\circ \text{C}$ в пределах толщины оболочки корпуса приращения напряжений на его наружной и внутренней поверхности равны [2, с. 399]:

$$D_1 = \frac{u + a_1}{b_2};$$

$$u_{1,2} = \frac{b_{10} \pm \sqrt{b_{10}^2 + 4 \cdot b_7 \cdot b_8}}{2 \cdot b_7};$$

$$b_1 = \frac{r_2 \cdot r_1}{E_\delta};$$

$$b_2 = \frac{r_2 \cdot r}{\delta E_\delta};$$

$$b_3 = \frac{E_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot (t_1 - t_2)}{2 \cdot (1 - \mu_\delta) \cdot \delta_\delta};$$

$$b_4 = \frac{(C_2 + C_1 \cdot \mu_\delta) E_\delta}{2};$$

$$b_5 = b_3 \cdot b_1^2;$$

$$b_6 = b_4 \cdot b_1;$$

$$b_7 = r \cdot b_2;$$

$$b_8 = -b_5 \cdot a_1;$$

$$b_9 = b_2 \cdot b_6;$$

$$b_{10} = b_9 - b_5;$$

$$b_{11} = 4 \cdot b_7 \cdot b_8;$$

$$b_{12} = b_{10} - b_{11};$$

$$b_{13} = \sqrt{b_{12}};$$

$$b_{14} = b_{13} - b_{10};$$

$$b_{15} = -b_{10} - b_{13};$$

$$u_1 = \frac{b_{14}}{2 \cdot b_7};$$

$$u_2 = \frac{b_{15}}{2 \cdot b_7};$$

$$\Delta_c = C_2 \cdot r_2;$$

$$a_1 = \alpha_\delta \cdot \frac{(t_1 + t_2)}{2} \cdot r - \quad (7)$$

$$- C_2 \cdot r_2 - \Delta_c - \alpha \cdot r_2 \cdot t_3 - \Delta_i$$

В расчетах напряжений в корпусе от веса жидкого чугуна, собственного веса и веса футеровки соединение боковых днищ с корпусом принимаем шарнирным, а незначительным продольным растяжением, обусловленным давлением жидкого чугуна на крышки, пренебрегаем и представляем корпус как свободно опертый резервуар [1, с. 206—211]. Соблюдая закон статического равновесия, для наиболее напряженного сечения оболочки кожуха, расположенного в среднем по длине сечения миксера, с учетом наличия футеровки и собственного веса корпуса находим:

$$\sigma_1 = \sigma_1 \pm \sigma_1;$$

$$\sigma_2 = \sigma_2 \pm \sigma_2;$$

$$\sigma_1' = \frac{S}{\delta} = \gamma_1 \frac{r_1^2}{r} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} C_n' \cdot \psi_n(\beta) \cdot \cos n \cdot \varphi;$$

$$\sigma_1'' = \frac{6 \cdot M}{\delta^2} = \gamma_1 \frac{r_1^2}{r} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} C_n'' \cdot \psi_n(\beta) \cdot \cos n \cdot \varphi;$$

$$\sigma_2' = \frac{T}{\delta} = \gamma_2 \frac{r_1^2}{r} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} d_n' \cdot \psi_n(\beta) \cdot \cos n \cdot \varphi;$$

$$\sigma_2'' = \frac{6 \cdot K}{\delta^2} = \gamma_2 \frac{r_1^2}{r} \cdot \sum_{n=0}^{n=\infty} d_n'' \cdot \psi_n(\beta) \cdot \cos n \cdot \varphi;$$

Здесь σ_1 — меридиональные (σ_1) и кольцевые (σ_2) напряжения, обусловленные внутренними силами и моментами, β , φ — центральные углы (рис. 2);

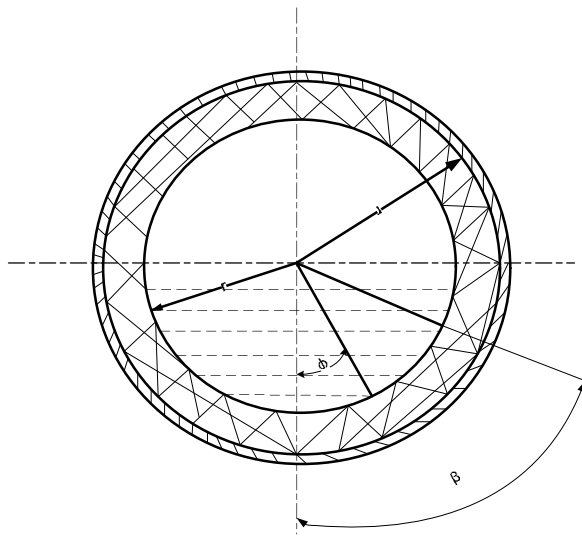


Рис. 2. Расчетная схема

$$v_1 = v_2 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot v_m + \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot (r - r_1) \cdot v_\phi \cdot \frac{r + r_1}{2r}}{v_2 \cdot \pi \cdot r_1^2} \right];$$

$$v_2 = 6.9 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{см}^3;$$

$$v_\phi = 2.6 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{см}^3;$$

$$v_m = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{см}^3.$$

В выражениях при определении α можно ограничиться шестью членами, стоящими под знаком 2 [1, с.208—211].

Для учета влияния веса корпуса на величину σ_2 разложим вес единицы поверхности стенки по нормали и касательной к поверхности и таким образом определим добавочное давление на стенку [1, с. 215]:

$$\Delta P = \left[v_m \cdot \delta + v_\phi \cdot (r - r_1) \cdot \frac{r + r_1}{2 \cdot r} \right] \cdot \cos \varphi$$

Нами был сделан расчет 1300-т миксера, выпускаемого НКМЗ, с использованием следующих данных [3, 4]: $t_4=1350^\circ \text{C}$; $t_3=120^\circ \text{C}$; $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$; $\alpha_\phi=10^{-6}$; $E=2,1 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{см}^2$; $E_\phi=15 \cdot 10^4 \text{ кг} / \text{см}^2$; $\mu=0,3$; $\mu_\phi=0,16$; $C_1 = 4 \cdot 10^{-3}$; $C_2=10^{-3}$ (по заводским данным).

Напряженно-деформированное состояние кожуха (рис. 3) определяли методом тензометрирования миксера № 3 конвертерного цеха завода им. Ильича при разогреве и последующем наполнении чугуном после

ремонта футеровки. Для измерения напряжений были использованы тензодатчики, обеспечивающие компенсацию температурного приращения сопротивления в условиях переменной и постоянной.

Некоторую несимметричность в распределении напряжений относительно оси симметрии конструкции можно объяснить неравномерностью разогрева футеровки (разница температуры по длине миксера достигала 50°C), разной толщиной набойки и шириной швов, а также неравномерностью расположения последних.

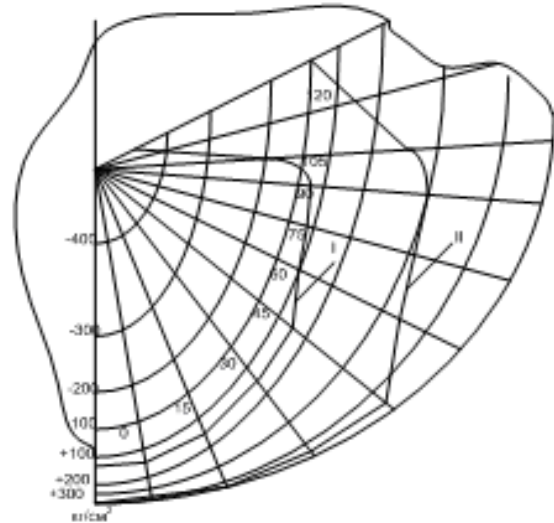


Рис. 3. Напряжения в среднем поперечном сечении кожуха миксера от весовых факторов при максимальном заполнении чугуном.

Предложенная методика позволит дать обоснование прочностных характеристик миксеров, повысить их надежность и гарантировать безопасность работы.

Выводы

Предложенная методика определения напряженно-деформированного состояние кожуха сварного миксера дает обоснование прочностных характеристик миксеров, позволяет повысить их надежность и гарантировать безопасность работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канторович З.Б. Основы расчетов химических машин и аппаратов. М.: Гостехтеоретиздат, 1960. – 438 с.
2. Целиков А.И., Полухин П.И. и др. Машины и агрегаты сталеплавильных цехов. М.: Металлургия, 1978. – 328 с.