

УДК 621-462:539.4.013

В.П. Белоус, магистр, Одес. нац. политехн. ун-т

УЧЕТ ЛОКАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ПРОЧНОСТИ

В.П. Белоус. **Врахування локальних відхилень від правильної форми циліндричних оболонок при оцінці їх міцності.** Розглянуто тонкостінну циліндричну оболонку під дією внутрішнього тиску при наявності на її поверхні локальної вм'ятини, основною частиною якої є сферичний сегмент, а перехідна частина моделюється тором. Для відповідних оболонок обертання і умов їх спряження використовувались лінійні диференціальні рівняння в комплексній формі. Запропоновано методику розрахунку параметрів напруженого стану і виконано локальну міцнісну оцінку циліндричної оболонки у зоні вм'ятини як концентратора напружень.

Ключові слова: циліндрична оболонка, вм'ятини, напруження, концентрація, міцність.

В.П. Белоус. **Учет локальных отклонений от правильной формы цилиндрических оболочек при оценке их прочности.** Рассмотрена тонкостенная цилиндрическая оболочка под действием внутреннего давления при наличии на ее поверхности локальной вмятины, основной частью которой является сферический сегмент, а переходная часть моделируется тором. Для соответствующих оболочек вращения и условий их сопряжения использовались линейные дифференциальные уравнения в комплексной форме. Предложена методика расчета параметров напряженного состояния и выполнена локальная прочностная оценка цилиндрической оболочки в зоне вмятины как концентратора напряжений.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, вмятина, напряжение, концентрация, прочность.

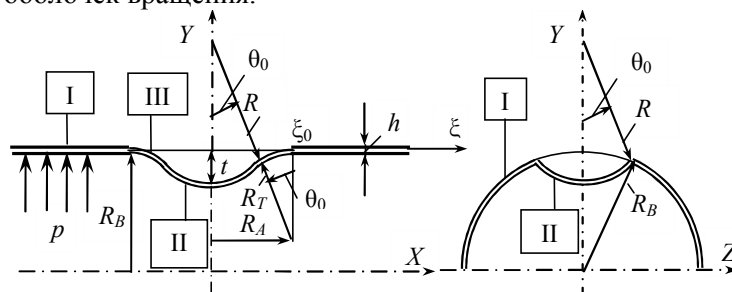
V.P. Belous. **The account of local deviations of cylindrical shells from the correct form in estimating their strength.** A thin-walled cylindrical shell under the action of internal pressure is considered in the presence of a local cavity on its surface, the basic part of which is the spherical segment, and the transitive part is modeled with the torus. The linear differential equations for the corresponding shells of revolution and conditions of their interfaces were used in the complex form. The calculation procedure of the stress state parameters is suggested and the local strength of the cylindrical shell in the cavity zone, as the stress concentrator, is estimated.

Keywords: cylindrical shell, cavity, stress, concentration, strength.

На поверхностях корпусных цилиндрических оболочечных элементов машин и аппаратов строительной индустрии и химического машиностроения в силу различных причин технологического и эксплуатационного характера неизбежны отклонения от правильной формы (началь-

ные несовершенства), среди которых следует отметить вмятины [1]. Их наличие, как концентраторов напряжений, может привести к превышению эксплуатационными напряжениями допустимых значений. Существующие рекомендации по допустимому отклонению прямолинейности образующей цилиндрических корпусов, например, по нормам котлонадзора [2] 3 мм на 1 м длины, не имеют достаточного теоретического обоснования в силу очевидных математических сложностей при определении параметров напряжено-деформированного состояния (НДС). В этой связи проведенные исследования можно считать весьма актуальными для разработки методики локального прочностного расчета цилиндрических оболочек в зоне вмятины.

Рассматривается тонкостенная цилиндрическая оболочка с радиусом срединной поверхности R_B , находящаяся под действием внутреннего давления p , изотропный материал которой имеет модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ (см. рисунок). Считалось, что саму вмятину определяет углубленный на величину t в цилиндрическую поверхность сферический сегмент с радиусом срединной поверхности R_D и она представлялась как результат плавного сопряжения трех частей с одинаковой толщиной h : цилиндра I, сферы II и тора III, который представляет собой переходную часть от части I к части II. Каждая из этих частей соответствует определенному типу оболочек вращения.



Расчетная схема участка цилиндрической оболочки с вмятиной

Срединную поверхность любой из этих трех оболочек определяют два главных радиуса ее кривизны: меридиана R_1 и параллели R_2 . В качестве главных криволинейных координат точки на этой поверхности принимается угол θ , который образует нормаль n к поверхности с осью оболочки, и угол φ , который определяет положение точки на окружности параллельного круга с радиусом $R_0 = R_2 \sin \theta$, соответствующим углу θ . Элементы дуг главных линий кривизны будут $ds_1 = R_1 d\theta$ и $ds_2 = R_0 d\varphi$. При краевых и поверхностных осесимметричных нагрузках основное дифференциальное уравнение оболочек вращения удобно использовать в комплексной форме [3]

$$\frac{d^2}{d\theta^2} \tilde{T} + \left[\left(\frac{2R_1}{R_2} - 1 \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} - \frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{d\theta} \right] \cdot \frac{d}{d\theta} \tilde{T} + \frac{i}{c} \frac{R_1^2}{R_2} \tilde{T} = \frac{i}{c} \frac{R_1^2}{R_2} F(\theta), \quad (1)$$

где $\tilde{T} = \tilde{T}_1 + \tilde{T}_2$ — комплексная функция Новожилова;

$$\tilde{T}_1 = T_1 - \frac{i}{c} \frac{M_2 - \mu M_1}{1 - \mu^2};$$

$$\tilde{T}_2 = T_2 - \frac{i}{c} \frac{M_1 - \mu M_2}{1 - \mu^2};$$

$c = h / \sqrt{12(1 - \mu^2)}$ — параметр;

$$F(\theta) = -p_n R_2 - \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{\sin^2 \theta} \left(C_F - \int_{\theta_0}^{\theta} (p_n \cos \theta + p_1 \sin \theta) R_1 R_2 \sin \theta d\theta \right);$$

p_1, p_n — меридиональная и нормальная составляющие нагрузки;
 C_F — постоянная.

Здесь нормальные усилия T_1, T_2 и изгибающие моменты M_1, M_2 определяют выражения

$$T_1 = \operatorname{Re} \tilde{T}_1; \quad T_2 = \operatorname{Re} \tilde{T}_2; \quad M_1 = -c \operatorname{Im}(\tilde{T}_2 - \mu \tilde{T}_1); \quad M_2 = -c \operatorname{Im}(\tilde{T}_1 - \mu \tilde{T}_2), \quad (2)$$

а угол поворота нормали ϑ к срединной поверхности и поперечное усилие Q_1 в плоскости XY

$$\vartheta = \operatorname{Re} \tilde{\vartheta}; \quad Q_1 = \frac{Eh}{R_2} c \operatorname{Im}(\tilde{\vartheta}),$$

где $\tilde{\vartheta} = -\frac{1}{Eh} \frac{R_2}{R_1} \frac{d\tilde{T}}{d\theta}$ — комплексная функция Мейсснера.

Радиальное перемещение Δ_R точек срединной поверхности и соответствующее усилие H_R в плоскости параллельного круга [3]

$$\Delta_R = \frac{R_0}{Eh} (T_2 - \mu T_1); \quad H_R = T_1 \cos \theta + Q_1 \sin \theta \quad (T_1 \sin \theta = Q_1 \cos \theta). \quad (3)$$

Общее решение линейного дифференциального уравнения (1) складывается из общего решения $\tilde{T}^{(a)}$ соответствующего однородного уравнения, которое можно определить по асимптотическому методу, и любого частного решения $T^{(*)}$ неоднородного уравнения, определяемого безмоментной теорией

$$\tilde{T} = \tilde{T}^{(a)} + T^{(*)}. \quad (4)$$

При этом справедливы формулы [3]

$$\tilde{T} = \tilde{T}_1 + \tilde{T}_2 = \tilde{T}^{(a)} + T_1^{(*)} + T_2^{(*)}; \quad \tilde{T}_1 = T_1^{(*)} = T_1; \quad \tilde{T}_2 = T_2^{(*)} + \tilde{T}^{(a)}; \quad M_2 = \mu M_1.$$

Условия плавного сопряжения двух каких-либо оболочек вращения 1 и 2 сводятся к требованию, чтобы на их общем краю при угле $\theta = \theta_K$ были одинаковыми четыре параметра:

$$\Delta_{(1)R} = \Delta_{(2)R}; \quad \vartheta_{(1)} = \vartheta_{(2)}; \quad H_{(1)R} = H_{(2)R}; \quad M_{(1)1} = M_{(2)1}. \quad (5)$$

С учетом зависимостей (3), а также выражений

$$\frac{d\tilde{T}}{d\theta} = -\frac{Eh}{R_2} \tilde{\vartheta} = -\frac{Eh}{R_2} \vartheta - \frac{i}{c} Q_1; \quad \tilde{T} = T_1 + T_2 - \frac{i}{c} \frac{M_1 + M_2}{1 + \mu} = (T_2 - \mu T_1) + (1 + \mu) T_1 - \frac{i}{c} M_1,$$

краевые условия (5) эквивалентны следующим условиям в комплексной форме:

$$\tilde{T}_{(1)} \Big|_{\theta=\theta_K} = \tilde{T}_{(2)} \Big|_{\theta=\theta_K}; \quad \frac{d\tilde{T}_{(1)}}{ds_1} \Big|_{\theta=\theta_K} = \frac{d\tilde{T}_{(2)}}{ds_1} \Big|_{\theta=\theta_K}. \quad (6)$$

Получены решения уравнения (1) при внутреннем давлении p ($p_1 = 0; p_n = \mp p$) для каждой из трех оболочек, а затем составлены условия их сопряжения.

Для цилиндрической оболочки радиусом R_B ($R_1 \rightarrow \infty; R_2 = R_0 = R_B$)

$$T_{B1}^{(*)} = 0,5 p R_B; \quad T_{B2}^{(*)} = p R_B; \quad T_B^{(*)} = T_{B1}^{(*)} + T_{B2}^{(*)} = 1,5 p R_B,$$

а общее решение в области $\xi \geq \xi_0$ и соответствующая производная [3]

$$\tilde{T}_B = \tilde{B} e^{-(1-i)b(\xi-\xi_0)} + T_B^{(*)}; \quad \frac{d\tilde{T}_B}{ds_1} = -\frac{(1-i)b}{R_B} \tilde{B} \cdot e^{-(1-i)b(\xi-\xi_0)}, \quad (7)$$

где $\xi - \xi_0 = (s_1 - s_0) / R_B$ — относительное расстояние от края цилиндрической оболочки;

$b = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \sqrt{R_B/h}$ — параметр;

$\tilde{B} = B_1 + iB_2$ — комплексная постоянная.

Согласно зависимостям (7) на стыке цилиндра с тором ($\xi = \xi_0$)

$$\tilde{T}_B = \tilde{B} + T_B^{(*)}; \quad \frac{d\tilde{T}_B}{ds_1} = -\frac{(1-i)b}{R_B} \tilde{B}. \quad (8)$$

В силу зависимостей (2) внутренние силовые факторы

$$M_{B1} = -c(B_2 \cos b\xi + B_1 \sin b\xi)e^{-b(\xi-\xi_0)}; \quad M_{B2} = \mu M_{B1};$$

$$T_{B2} = (B_1 \cos b\xi - B_2 \sin b\xi)e^{-b(\xi-\xi_0)} + T_{B2}^{(*)}; \quad T_{B1} = T_{B1}^{(*)}.$$

Для сферической оболочки радиусом R_D ($R_1 = R_2 = R_D$)

$$T_{D1}^{(*)} = -0,5pR_D; \quad T_{D2}^{(*)} = -0,5pR_D; \quad T_D^{(*)} = T_{D1}^{(*)} + T_{D2}^{(*)} = -pR_D,$$

а общее решение в области $0 \leq \theta \leq \theta_0$ и соответствующая производная [3]

$$\tilde{T}_D = \tilde{A}e^{-(1+i)a(\theta-\theta_0)} + T_D^{(*)}; \quad \frac{d\tilde{T}_D}{ds_1} = \frac{(1+i)a}{R_D} \tilde{A}e^{-(1+i)a(\theta-\theta_0)}, \quad (9)$$

где $\theta - \theta_0$ — угловое расстояние от края сферической оболочки;

$a = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{R_D/h}$ — параметр;

$\tilde{A} = A_1 + i \cdot A_2$ — комплексная постоянная.

Согласно зависимостям (9) на стыке сферы с тором ($\theta = \theta_0$)

$$\tilde{T}_D = \tilde{A} + T_D^{(*)}; \quad \frac{d\tilde{T}_D}{ds_1} = \frac{(1+i)a}{R_D} \tilde{A}. \quad (10)$$

В силу зависимостей (2) внутренние силовые факторы

$$M_{D1} = -c(A_2 \cos a\theta + A_1 \sin a\theta)e^{-a(\theta-\theta_0)}; \quad M_{D2} = \mu M_{D1};$$

$$T_{D2} = (A_1 \cos a\theta - A_2 \sin a\theta)e^{-a(\theta-\theta_0)} + T_{D2}^{(*)}; \quad T_{D1} = T_{D1}^{(*)}.$$

Для торовой оболочки с радиусом тора R_T и радиусом его круговой оси $R_A = (R_D + R_T) \sin \theta_0$ ($R_1 = R_T = \alpha R_A$; $R_2 = R_A(1 + \alpha \sin \theta) / \sin \theta$; $\alpha = R_T / R_A$) решения в соответствии с безмоментной теорией [3]

$$T_{T1}^{(*)} = \frac{pR_T}{2} \frac{2 + \alpha \sin \theta}{1 + \alpha \sin \theta} + \frac{pR_A}{2\alpha} \frac{\alpha}{(1 + \alpha \sin \theta) \sin \theta}; \quad T_{T2}^{(*)} = \frac{pR_T}{2} - \frac{pR_A}{2\alpha} \frac{1}{\sin^2 \theta};$$

$$T_T^{(*)} = T_{T1}^{(*)} + T_{T2}^{(*)} = \frac{pR_T}{2} \frac{3 + 2\alpha \sin \theta}{1 + \alpha \sin \theta} - \frac{pR_A}{2\alpha} \frac{1}{(1 + \alpha \sin \theta) \sin^2 \theta}.$$

Поскольку для этих оболочек общее решение уравнения (1) невозможно представить в форме (4), здесь вводится вспомогательная функция \tilde{V}_T [4], связанная с основной функцией \tilde{T}_T ,

$$\tilde{V}_T = \frac{(1 + \alpha \sin \theta)^2}{\sin \theta} \frac{d\tilde{T}_T}{d\theta} - i \frac{2k^2}{\text{tg} \theta} \frac{pR_A}{2\alpha} \left(2k^2 = \sqrt{12(1-\mu^2)} \frac{R_T^2}{h R_A} = \frac{\alpha R_T}{c} \right); \quad (11)$$

$$\tilde{T}_T = \frac{3+2\alpha\sin\theta}{1+\alpha\sin\theta} \frac{pR_T}{2} + \frac{i}{2k^2} \frac{1}{1+\alpha\sin\theta} \frac{d\tilde{V}_T}{d\theta}; \quad \frac{d\tilde{T}_T}{d\theta} = \frac{\sin\theta \cdot \tilde{V}_T}{(1+\alpha\sin\theta)^2} + i2k^2 \frac{pR_A}{2\alpha} \frac{\cos\theta}{(1+\alpha\sin\theta)^2}. \quad (12)$$

Общие выражения для вспомогательной функции (11) и ее производной

$$\tilde{V}_T = (1+\alpha\sin\theta)^{3/4} (\tilde{C}_1 \tilde{V}_1 + \tilde{C}_2 \tilde{V}_2) + \tilde{V}_T^{(*)}; \quad (13)$$

$$\frac{d\tilde{V}_T}{d\theta} = (1+\alpha\sin\theta)^{3/4} \left[\tilde{C}_1 \left(\frac{0,75\alpha\cos\theta}{1+\alpha\sin\theta} \tilde{V}_1 + \frac{d\tilde{V}_1}{d\theta} \right) + \tilde{C}_2 \left(\frac{0,75\alpha\cos\theta}{1+\alpha\sin\theta} \tilde{V}_2 + \frac{d\tilde{V}_2}{d\theta} \right) \right] + \frac{d\tilde{V}_T^{(*)}}{d\theta}, \quad (14)$$

где $\tilde{C}_1 = C_{11} + iC_{12}$ и $\tilde{C}_2 = C_{21} + iC_{22}$ — комплексные постоянные.

Функции \tilde{V}_1, \tilde{V}_2 связаны с функциями Ханкеля 1-го и 2-го рода $H_{1/3}^{(1)}, H_{1/3}^{(2)}$ [4]

$$\tilde{V}_{1,2}(\zeta) = i^{\pm 5/6} \sqrt{0,5\pi} (\zeta\sqrt{2i})^{1/3} H_{1/3}^{(1,2)}(\zeta\sqrt{2i}) \quad \left(\zeta = k \int_0^{\theta} \sqrt{\frac{\sin\theta}{1+\alpha\sin\theta}} d\theta \right).$$

Для этих функций и их производных в области отрицательных углов θ при $|\theta_0| < \pi/4$:

$$\tilde{V}_1 = -i\sqrt{\pi/2} [1,293e^{+i\pi/4}\zeta^{2/3}(1+i3\zeta^2/8) + 1,079e^{+5i\pi/12}(1+i3\zeta^2/4)];$$

$$\tilde{V}_2 = +i\sqrt{\pi/2} [1,293e^{+i\pi/12}\zeta^{2/3}(1+i3\zeta^2/8) + 1,079e^{-5i\pi/12}(1+i3\zeta^2/4)];$$

$$\tilde{V}_1' = -i\sqrt{\pi/2} [1,293e^{+i\pi/4}(2\zeta^{-1/3}/3 + i\zeta^{5/3}) + 1,079e^{+5i\pi/12}i3\zeta/2];$$

$$\tilde{V}_2' = +i\sqrt{\pi/2} [1,293e^{+i\pi/12}(2\zeta^{-1/3}/3 + i\zeta^{5/3}) + 1,079e^{-5i\pi/12}i3\zeta/2],$$

где $\zeta = k \int_0^{|\theta|} \sqrt{\frac{\sin|\theta|}{1-\alpha\sin|\theta|}} d|\theta|$ или $\zeta = \frac{2}{3}k|\theta|^{3/2} \left(1 + \frac{3}{10}\alpha|\theta| + \frac{9}{56}\alpha^2|\theta|^2 \right)$;

$$\frac{d\tilde{V}_{1,2}}{d\theta} = \frac{d\zeta}{d\theta} \frac{d\tilde{V}_{1,2}}{d\zeta} = k \sqrt{\frac{\sin|\theta|}{1-\alpha\sin|\theta|}} \frac{d\tilde{V}_{1,2}}{d\zeta}.$$

Частное решение $\tilde{V}_T^{(*)}$ можно представить в виде ряда [4]

$$\tilde{V}_T^{(*)} = \psi_{c1} \cos\theta + \psi_{s2} \sin 2\theta + \psi_{c3} \cos 3\theta + \psi_{c4} \sin 4\theta + \dots$$

и при этом первый его член определяет выражение

$$-\frac{2\tilde{D}}{\psi_{c1}} = \frac{1}{k^2} + \frac{1+i\alpha\frac{2\cdot 3}{2k^2}}{\frac{2^2}{k^2} + \frac{\left(1+i\alpha\frac{3\cdot 4}{2k^2}\right)\left(1+i\alpha\frac{1\cdot 2}{2k^2}\right)}{\frac{3^2}{k^2} + \frac{k^2}{4^2}\left(1+i\alpha\frac{4\cdot 5}{2k^2}\right)\left(1+i\alpha\frac{2\cdot 3}{2k^2}\right)}} \cdot \left(\tilde{D} = k^2 \frac{p}{\alpha} \frac{R_A}{2} - i\alpha \frac{p}{2} \frac{R_T}{2} \right).$$

В силу зависимостей (2) внутренние силовые факторы:

$$M_{T1} = -\frac{c}{2k^2} \left\{ \mu \frac{\alpha \cos\theta}{(1+\alpha\sin\theta)^2} \operatorname{Re} \tilde{V}_T + \left[\frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{1+\alpha\sin\theta} \operatorname{Re} \tilde{V}_T \right) \right] \right\}; \quad M_{T2} = \mu M_{T1};$$

$$T_{T1} = \frac{-\alpha \cos\theta}{2k^2(1+\alpha\sin\theta)^2} \left(\operatorname{Im} \tilde{V}_T + \frac{k^2 p R_A}{\alpha \operatorname{tg}\theta} \right) + T_{T1}^{(*)};$$

$$T_{T2} = \frac{d}{2k^2 d\theta} \left[\frac{-1}{1 + \alpha \sin \theta} \left(\operatorname{Im} \tilde{V}_T + \frac{k^2 p R_A}{\alpha \operatorname{tg} \theta} \right) \right] + T_{T2}^{(*)}.$$

Если подставить выражения (13), (14) в зависимости (12), в области $\theta_0 \leq \theta \leq 0$, то

$$\tilde{T}_T = \frac{3 + 2\alpha \sin \theta}{1 + \alpha \sin \theta} \cdot \frac{p R_T}{2} + \frac{i}{2k^2} \frac{1}{1 + \alpha \sin \theta} \left\{ \frac{d\tilde{V}_T^{(*)}}{d\theta} + \right. \\ \left. + (1 + \alpha \sin \theta)^{3/4} \left[\tilde{C}_1 \left(\frac{0,75\alpha \cos \theta}{1 + \alpha \sin \theta} \tilde{V}_1 + \frac{d\tilde{V}_1}{d\theta} \right) + \tilde{C}_2 \left(\frac{0,75\alpha \cos \theta}{1 + \alpha \sin \theta} \tilde{V}_2 + \frac{d\tilde{V}_2}{d\theta} \right) \right] \right\}; \quad (15)$$

$$\frac{d\tilde{T}_T}{ds_1} = \frac{1}{R_T} \frac{\sin \theta}{(1 + \alpha \sin \theta)^2} \left[\tilde{V}_T^{(*)} + (1 + \alpha \sin \theta)^{3/4} (\tilde{C}_1 \tilde{V}_1 + \tilde{C}_2 \tilde{V}_2) + i \frac{2k^2}{\operatorname{tg} \theta} \frac{p R_A}{2\alpha} \right]. \quad (16)$$

Краевые условия сопряжения (6) торовой оболочки с цилиндрической при $\theta = 0$ и со сферической при $\theta = -\theta_0$

$$\tilde{T}_T|_{\theta=0} = \tilde{T}_B|_{\theta=0}; \quad \frac{d\tilde{T}_T}{ds_1}|_{\theta=0} = \frac{d\tilde{T}_B}{ds_1}|_{\theta=0} \quad \text{и} \quad \tilde{T}_T|_{\theta=-\theta_0} = \tilde{T}_D|_{\theta=-\theta_0}; \quad \frac{d\tilde{T}_T}{ds_1}|_{\theta=-\theta_0} = \frac{d\tilde{T}_D}{ds_1}|_{\theta=-\theta_0}. \quad (17)$$

После подстановки выражений (8), (10), (15), (16) для комплексных функций и их производных для трех оболочек в условия (17) получится система линейных алгебраических уравнений, решая которую можно найти значения комплексных постоянных \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{C}_1 , \tilde{C}_2 , определяющих внутренние силовые факторы для всех трех оболочек, образующих вмятину.

Выполнен тестовый расчет цилиндрической оболочки с вмятиной при следующих исходных данных: $h = 0,020$ м, $R_B = 1,0$ м, $R_D = 1,0$ м, $R_T = 0,25$ м, $t = 0,020$ м ($\theta_0 = -8^\circ$), $p = 1,6$ МПа, $\mu = 0,3$. Полученные значения нормальных напряжений $\sigma_1 = T_1 / h \pm 6M_1 / h^2$ и $\sigma_2 = T_2 / h \pm 6M_2 / h^2$ для всех трех определяющих вмятину оболочек представлены в таблице.

Результаты расчета нормальных напряжений в зоне вмятины

$\xi - \xi_0$	Цилиндр		Тор			Сфера		
	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	θ , град	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	θ , град	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
1,0	40,0	80,0	0	-126	-83,2	-8	260	112
0,5	14,7	46,6	-4	174	88,1	-4	-32,0	-78,5
0	-126	-83,2	-8	260	112	0	-24,1	-74,8

В зоне безмоментного НДС цилиндрической оболочки вдали от вмятины $\sigma_1^{(*)} = T_{B1}^{(*)} / h = 40$ МПа и $\sigma_2^{(*)} = T_{B2}^{(*)} / h = 80$ МПа, а соответствующее эквивалентное напряжение по теории Мизеса $\sigma_e^{(*)} = \sqrt{(\sigma_1^{(*)})^2 + (\sigma_2^{(*)})^2 - \sigma_1^{(*)}\sigma_2^{(*)}} = 69,3$ МПа. В области же вмятины эти напряжения распределены очень неравномерно, достигая наибольшей величины на стыке торовой и сферической оболочек: $\sigma_{1\max} = 260$ МПа и $\sigma_{2\max} = 112$ МПа. Соответствующее эквивалентное напряжение $\sigma_{e\max} = 226$ МПа определяет коэффициент концентрации напряжений $K_\sigma = 3,2$. Данное значение показывает, насколько опасными с позиции прочности могут являться вмятины на поверхности корпусных цилиндрических оболочек машин и аппаратов высокого давления.

Предложенная методика прочностного расчета может быть использована для рекомендаций относительно допускаемого давления при наличии вмятин конкретных размеров и для определения допускаемых размеров вмятин при конкретном эксплуатационном давлении.

Литература

1. Рахмилевич, З.З. Справочник механика химических и нефтехимических производств / З.З. Рахмилевич, И.М. Радзин, С.А. Фармазов. — М.: Химия, 1985. — 591 с.
2. Сборник правил и нормативно-технических документов по котлонадзору — М.: Машиностроение, 1993. — 267 с.
3. Новожилов, В.В. Линейная теория тонких оболочек / В.В. Новожилов, К.Ф. Черных, Е.И. Михайловский. — Л.: Политехника, 1991. — 656 с.
4. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. — Л.: Судостроение, 1962. — 431 с.

References

1. Rakhmievich, Z.Z. Spravochnik mekhanika khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv [The Handbook for a Chemical and Petrochemical Industry Mechanic] / Z.Z. Rakhmievich, I.M. Radzin, S.A. Faramazov. — Moscow, 1985. — 591 p.
2. Sbornik pravil i normativno-tekhnicheskikh dokumentov po kotlonadзору [The Collection of Rules and Technological Normative Documents in Boiler Inspection] — Moscow, 1993. — 267 p.
3. Novozhilov, V.V. Lineynaya teoriya tonkikh obolochek [Linear Theory of Thin Shells] / V.V. Novozhilov, K.F. Chernykh, E.I. Mi-khaylovskiy. — Leningrad, 1991. — 656 p.
4. Novozhilov, V.V. Teoriya tonkikh obolochek [Theory of Thin Shells] / V.V. Novozhilov. — Leningrad, 1962. — 431 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. ун-та Дашенко А.Ф.

Поступила в редакцию 18 июля 2011 г.