

$\varepsilon_p^*(\omega)$ – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста) в конце рассматриваемого шага нагружения;

$\varepsilon_i(\omega)$ – интенсивность деформаций в конце рассматриваемого шага нагружения;

$\Delta\varepsilon_p^* > 0$ – приращение накопленной пластической деформации на рассматриваемом шаге нагружения;

ε_f – располагаемая пластичность материала.

По экспериментальным данным [2] показатели степени в уравнениях (6) и (7): $m_p = 0,5 \dots 0,6$; $m_e = 0,10 \dots 0,12$.

Накопленное за рассматриваемый период работы $[\omega_0, \dots \omega_k]$ повреждение:

$$\Omega = \Omega_0 + \sum^k \Delta\Omega_e + \sum^k \Delta\Omega_p,$$

где: Ω_0 – начальное повреждение. Для неповрежденной конструкции $\Omega = 0$. Предельное состояние достигается при $\Omega = 1$.

Численная реализация разработанного метода и алгоритма компьютерного анализа упругопластического деформирования трубчатых элементов конструкций осуществлена в виде программного обеспечения. Программный комплекс «Life Cycle» имеет модульную структуру, функционирует в операционных системах Windows XP/7, предоставляет пользователю удобный, интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс.

Программный продукт предназначен для применения в отраслевых САПР и ERP-системах, допускает автономное использование. Позволяет выполнять численный анализ несущей способности и располагаемого ресурса трубчатых элементов, прогнозировать долговечность изделий в условиях нестационарного силового и температурного воздействия, осуществлять мониторинг остаточного ресурса оборудования в режиме on-line.

Литература

1. Коротких Ю.Г., Угодчиков А.Г. Уравнения теории термовязкопластичности с комбинированным упрочнением. – М.: Наука, 1981. 188 с.
2. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. 288 с.

Оценка коэффициента запаса прочности выпуклых днищ, находящихся под внутренним равномерным давлением

к.т.н. Лянг В.Ф.

Университет машиностроения

Аннотация. Работа посвящена вопросам вывода инженерных формул в ГОСТе 14249-89 для расчета эллиптических днищ, находящихся под внутренним равномерным давлением, их численному моделированию напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов и сравнительной оценке коэффициента запаса прочности, принятого в ГОСТе 14249-89, с результатами численного эксперимента.

Ключевые слова: сосуды под давлением, коэффициент запаса прочности, метод конечных элементов

Коэффициент прочности есть отношение напряжения текучести к допускаемому напряжению. Рекомендуемая величина коэффициента запаса прочности согласно ГОСТу 14249-89 [1] равна 1.5. Расчетной величиной выпуклого днища является его толщина в зависимости от заданных значений: геометрических размеров, коэффициента прочности сварных

швов, внутреннего давления, коэффициента прочности или допускаемого напряжения материала. Поскольку в ГОСТе 14249-89 не предусмотрен вывод расчетных формул, возникает вопрос об истинном значении коэффициента запаса прочности. С этой целью был проведен анализ и сравнение методов расчетов на прочность выпуклых днищ, находящихся под внутренним равномерным давлением. Сравниваются два метода расчета: инженерный по ГОСТу 14249-89 [1] для эллиптических, торосферических и полусферических днищ аппаратов химического машиностроения и конечно-элементный, выполненный в системе Ansys.

В основу расчета выпуклых днищ, нагруженных внутренним избыточным давлением, положен критерий прочности Губера-Мизеса-Генки [2]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, $[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала днища.

Рассмотрим эллиптическое днище, находящееся под действием внутреннего равномерного давления (рисунок 1).

Расчет по ГОСТу включает расчет минимальной толщины днища s_p и допускаемого давления $[p]$ для заданного значения s (исполнительная толщина) по формулам:

$$s_p = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p}, \quad (2)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{R + 0,5 \cdot (s - c)}, \quad (3)$$

где: φ – коэффициент прочности сварных швов на днище, значение которого находится в пределах от 0.65 до 1; c – коррозионная добавка.

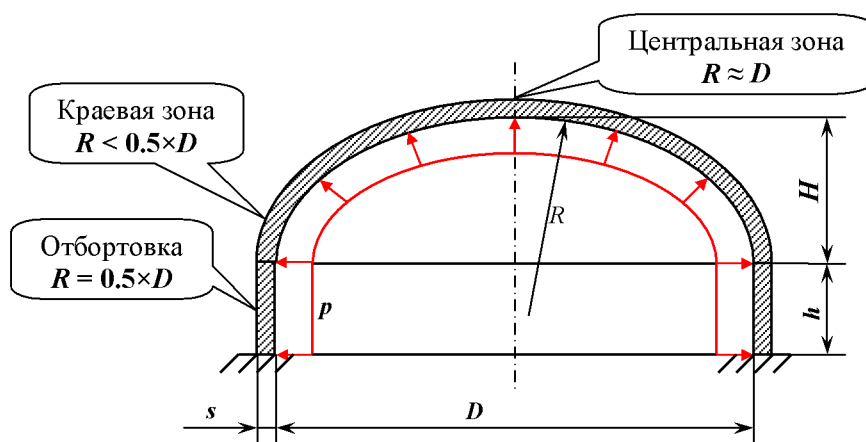


Рисунок 1 – Расчетная схема эллиптического днища

Анализ этих расчетных формул и литературы [1 – 3] позволяет сделать вывод, что расчет величин s_p и $[p]$ проводился из условия прочности (1) для центральной зоны выпуклого днища, то есть для точки с наибольшим радиусом кривизны, который для эллиптического днища определяется следующим образом:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H}. \quad (4)$$

Для доказательства этого утверждения в верхней части выпуклого днища выделим четырехугольный элемент, на боковые грани которого действуют главные нормальные напряжения σ_1 и σ_2 . Так как сжатия или растяжения толщины элемента по нормали к поверхности практически нет, то $\sigma_3 = 0$. Ввиду симметричности днища и действующей нагрузки $\sigma_1 = \sigma_2$. Таким образом, получаем, что $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 = \sigma_2$. Согласно [2, 3] формула для эквивалентного напряжения примет вид:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot s} \quad (5)$$

Из [1] при равенстве допускаемого и эквивалентного напряжений имеем:

$$[\sigma] = \sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{p \cdot R + 0,5 \cdot p \cdot s_p}{2 \cdot \varphi \cdot s_p} \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) отличаются незначительно. Эти отличия вызваны, скорее всего, экспериментальными данными. Составляющая $0,5 \cdot p \cdot s_p$ увеличивает $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ и соответственно уменьшает s_p максимум на 5 %. Если принять, что $\sigma_{\text{ЭКВ}} = [\sigma]$ и из (6) выразить s_p , то получим формулу (2). Очевидно, что наибольшая толщина днища будет в центральной зоне, где максимальный радиус кривизны. Условие прочности (1) выполняется. Но оно выполняется для центральной зоны. Предположение о том, что напряженно-деформированное состояние простейшего четырехугольного элемента в краевой зоне, где радиус кривизны днища минимальный, будет таким же, как и в центральной, в корне неверно.

Сравнительный анализ результатов расчета по ГОСТу [1] и конечно-элементному методу проводился для эллиптических днищ следующим образом. Первым выполнялся расчет по ГОСТу, из которого были получены расчетные значения толщины днища s_p (2) и допускаемого давления $[p]$ (3). Далее методом конечных элементов (МКЭ) определялись эквивалентные напряжения (1) в центральной зоне (рисунок 1) для расчетной толщины s_p и рабочего давления p или для исполнительной толщины s и допускаемого давления $[p]$. Если эквивалентные напряжения, вычисленные по МКЭ, будут порядка допускаемого напряжения, то расчет напряженно-деформированного состояния эллиптических днищ выполняется правильно.

Исходные данные для расчета эллиптического днища: модуль упругости стали – $E = 200000$ МПа, допускаемое напряжение – $[\sigma] = 160$ МПа, толщина днища – $s = 5$ мм, диаметр днища – $D = 400$ мм, высота днища – $H = 100$ мм, длина отбортовки – $h = 25$ мм, коэффициент запаса прочности сварных швов – $\varphi = 1$, рабочее внутреннее давление – $p = 1$ МПа. При расчете по ГОСТу были получены результаты: расчетная толщина днища – $s_p = 1.25$ мм и допускаемое внутреннее давление – $[p] = 3.98$ МПа.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния эллиптического днища (рисунок 2), расчетная схема которого представлена на рисунке 1, при $s = 1.25$ мм и $p = 3.98$ МПа по МКЭ в системе Ansys показал, что максимальные эквивалентные напряжения составляют в центральной зоне $\sigma_{\text{ЭКВ}c} = 173.4$ МПа, а в краевой зоне $\sigma_{\text{ЭКВ}r} = 225.686$ МПа.

Таким образом, относительная погрешность эквивалентных напряжений в центральной зоне по двум методам составит:

$$\delta = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}c} - [\sigma]}{[\sigma]} \cdot 100\% = \frac{173,4 - 160}{160} \cdot 100\% = 8,375\% \quad (7)$$

Относительная погрешность эквивалентных напряжений, рассчитанных по МКЭ, для центральной и краевой зон будет:

$$\delta = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}r} - \sigma_{\text{ЭКВ}c}}{\sigma_{\text{ЭКВ}c}} \cdot 100\% = \frac{225,686 - 173,4}{173,4} \cdot 100\% = 30,15\% \quad (8)$$

Сравнивая полученные результаты при расчетах эллиптического днища по ГОСТу и МКЭ, можно сделать выводы:

Так как разница вычисленных эквивалентных напряжений в центральной зоне по ГОСТу и по методу конечных элементов (7) составляет менее 10%, то расчет по МКЭ является достоверным.

Периферийные эквивалентные напряжения для эллиптического днища, вычисленные

по МКЭ (8), как минимум на 30 % больше напряжений в центральной зоне.

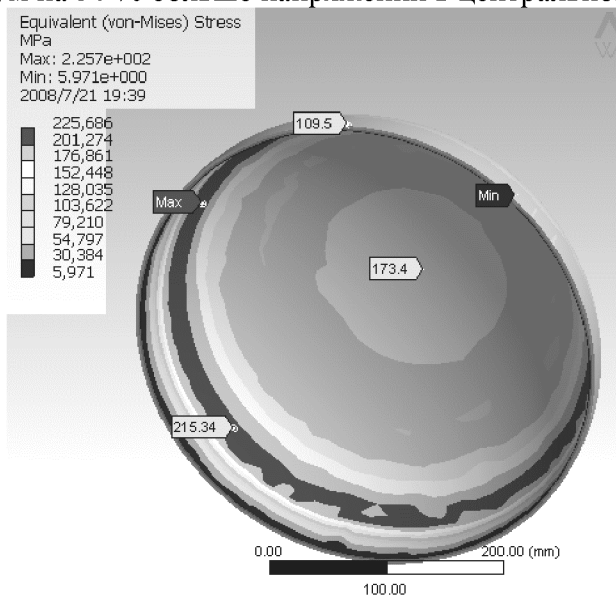


Рисунок 2 – Изображение численных значений эквивалентных напряжений по критерию Губера-Мизеса-Генки на внутренней поверхности эллиптического днища

Для эллиптического днища, учитывая вывод 2, при напряжении $\sigma_{\text{эКВС}} = [\sigma] = 160$ МПа в центральной зоне эквивалентное напряжение в краевой зоне $\sigma_{\text{ЭКВГ}}$ составит 208 МПа. Таким образом, коэффициент запаса прочности будет меньше 1,5, минимального значения, принятого в ГОСТе 14249-89, и при напряжении текучести материала $\sigma_T = 240$ МПа равен 1.154.

Расчет на прочность эллиптических, торосферических и полусферических днищ, находящихся под внутренним давлением, по ГОСТу 14249-89 проводится только для центральной зоны и не дает полной картины как о напряженно-деформированном состоянии, так и о коэффициенте запаса прочности конструкции. Фактически напряженно-деформированное состояние днища при расчетной толщине (2) или при исполнительной толщине, но под предельным внутренним давлением (3), будет находиться в непосредственной близости от зоны текучести материала.

Литература

1. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 79 с.
2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: «Наукова думка», 1975. – 704 с.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: «Наука», 1972. – 544 с.

Автоматизированный расчет мощности обогрева и времени разогрева прессовой формы в пусковом режиме

к.т.н. доц. Лянг В.Ф.

Университет машиностроения

Аннотация. Работа посвящена описанию программного обеспечения Polymer предназначенного для расчета мощности обогрева и времени разогрева прессовой формы в пусковом режиме.

Ключевые слова: расчёт мощности обогрева, прессовая форма

Расчет мощности необходим для определения максимального количества изделий, которые можно изготовить за время эксплуатации формы до полного ее износа. Время разогрева прессовой формы определяет производительность машины по изготовлению изделий из