

УДК-539.3

Б. Я. Кантор^{*}, д-р. техн. наук**В. М. Долинский**^{**}, канд. техн. наук**Р. Л. Онацкий**^{**}

^{*} Институт проблем машиностроения им. А. П. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, E-mail: bkantor@ukr.net)

^{**} ОАО «УкрНИИхиммаш».
(г. Харьков, E-mail: r_onatskiy@ukr.net)

СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВМЯТИНЫ

На основе метода конечных элементов проведены численные исследования для оценки статической прочности и определения напряженно-деформированного состояния сосуда в области вмятины, с учетом геометрической и физической нелинейностей. Рассмотрен процесс образования вмятины под воздействием индентора, разгрузка и последующее нагружение сосуда допускаемым давлением.

На основі методу скінченних елементів проведено чисельні дослідження для оцінки статичної міцності та визначення напружено-деформованого стану посудини в зоні вм'ятини, з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей. Розглянуто процес утворення вм'ятини під дією індентора, розвантаження та наступне навантаження посудини внутрішнім допустимим тиском.

Введение

Вмятина является распространенным геометрическим дефектом. Около десяти процентов технологического оборудования, эксплуатируемого на химических и нефтеперерабатывающих производствах, содержат вмятины.

Допустимость эксплуатации сосудов с таким дефектом вызывает сомнения. Поэтому в ряде случаев выполняется ремонт с рихтовкой под местным нагревом или с вырезкой поврежденного участка корпуса и с сваркой латки.

Проведенный анализ более тридцати аппаратов с вмятинами показал, что если не брать во внимание очень больших аппаратов, на стенках которых глубины вмятин могут быть в 20 раз больше толщины, то в среднем глубина вмятины находится в пределах от 1 до 2 толщин. Также вмятины в основном бывают круглыми и эллиптическими в плане.

Имеющиеся методы расчета сосудов с вмятинами [1, 2] основаны на теории предельного равновесия и не учитывают напряженно-деформированного состояния (НДС) в области вмятины. В этих методах вмятины представляются бесконечными по всей длине обечайки и не учитываются конечные размеры вмятин, что приводит к необоснованно большому ослаблению рассчитываемой конструкции. Например, для оболочки с вмятиной, глубина которой равна одной толщине, вне зависимости от других ее размеров, по имеющимся методам расчета [1] необходимо вводить множитель, который снижает допускаемые нагрузки на 55%, а для вмятин с глубиной, равной двум толщинам, – на 74%, что в большинстве случаев является необоснованным.

Основная часть

В настоящей работе для оценки статической прочности и определения НДС в области вмятины проведены численные исследования на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Рассмотрен процесс образования вмятины под воздействием индентора, разгрузка и последующее нагружение сосуда допускаемым по имеющимся нормам давлением [3].

В качестве примера выбран типовой сосуд (см. рис. 1), с геометрическими параметрами обечайки $\gamma = D/2h = 100$.

Диаметр аппарата $D = 3000$ мм, толщина стенки $h = 15$ мм, длина сосуда 7500 мм.

Температура стенки 20 °С, материал сталь Ст3. Предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 460$ МПа, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 840$ МПа, деформации при разрыве образца $\delta = 0,25$. Нормативные допускаемые напряжения $[\sigma] = 166$ МПа [3]. Вмятина: глубина $S = 22,5$ мм ($1,5h$), длина $c = 3300$ мм и ширина $b = 580$ мм.

Задача решена в физически и геометрически нелинейной постановке. Физические свойства материала определяются теорией малых упругопластических деформаций с билинейным, кинематическим упрочнением.

При решении задачи мы рассматривали только цилиндрическую обечайку. Геометрическая модель обечайки показана на рис. 2 и представляет собой (цилиндрическую оболочку) диаметром $D = 3000$ мм, толщиной $h = 15$ мм и длиной $L = 7500$ мм.

Выполнен учет симметрии – рассмотрена четверть оболочки, при этом со стороны отброшенных частей приложены соответствующие ограничения. При нагружении внутренним давлением со стороны отброшенных днщ прикладывались растягивающие усилия.

В качестве индентора взят сферический штамп с диаметром $D_i = 600$ мм.

Для решения задачи использовались объемные 20-узловые конечные элементы (КЭ) (см. рис. 3) с тремя степенями свободы (U_x, U_y, U_z) в каждом узле [4]. Выбор объемных КЭ основан на том, что на этапе образования вмятины в зоне вдавливания штампа возникает объемное напряженно-деформированное состояние. При формировании вмятины были использованы контактные конечные элементы, моделирующие «жестко-податливый» контакт.

При выполнении расчета использовалась неоднородная конечноэлементная сетка со сгущением к центру вмятины (рис. 2). Для выбора размера КЭ выполнена серия расчетов, направленная на оценку сходимости решения по числу КЭ.

Для первого расчета было взято 800 КЭ (20 элементов по длине оболочки, 20 в окружном направлении и 2 элемента по толщине) со сгущением к точке контакта оболочки со штампом. После варьирования размеров элементов для дальнейших расчетов остановились на количестве – 25600 КЭ (по толщине – 4 элемента; в осевом и окружном направлениях –

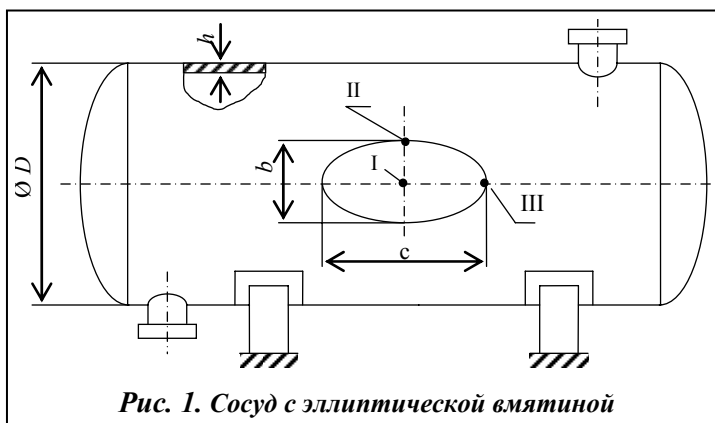


Рис. 1. Сосуд с эллиптической вмятиной

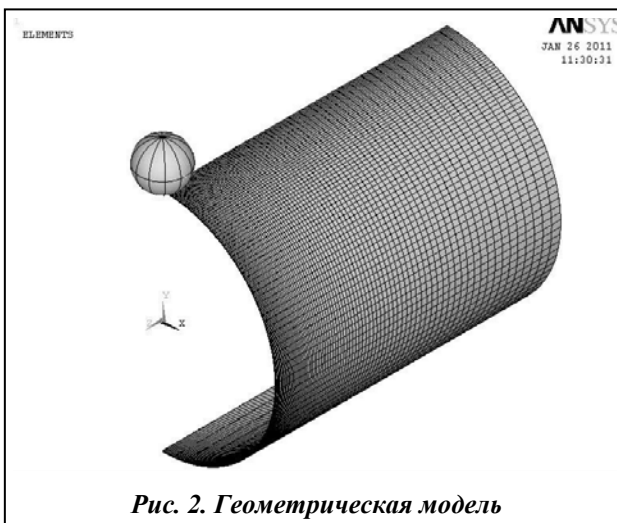


Рис. 2. Геометрическая модель

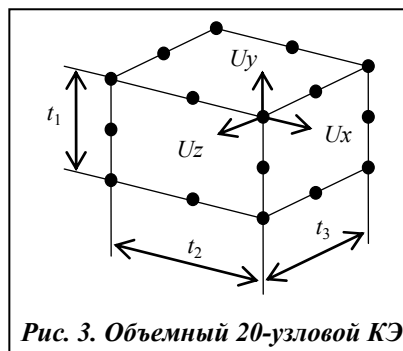
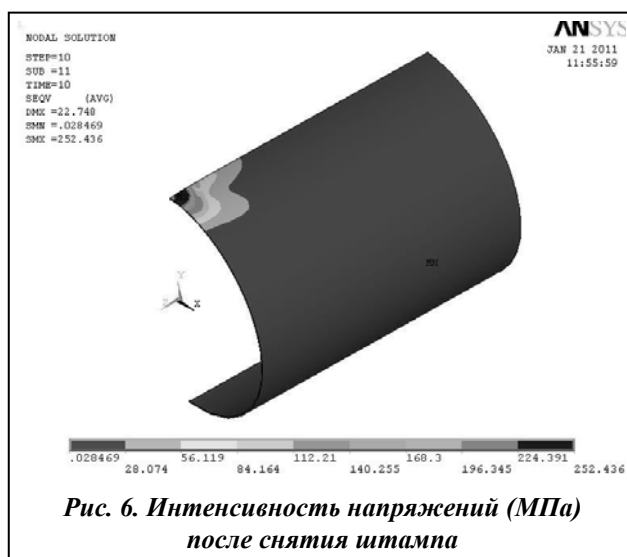
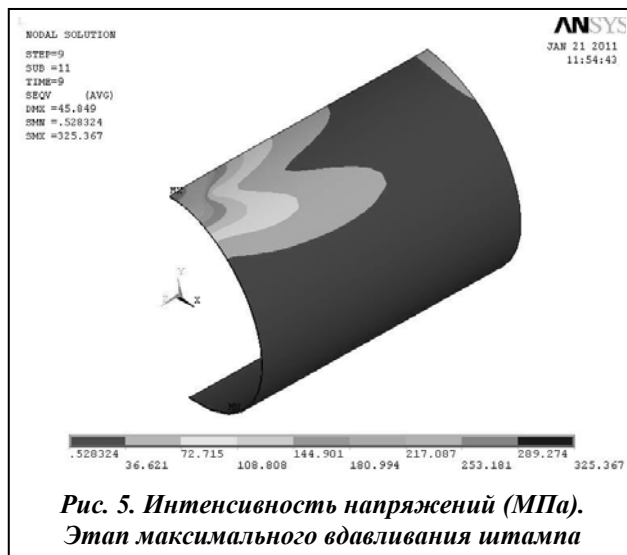
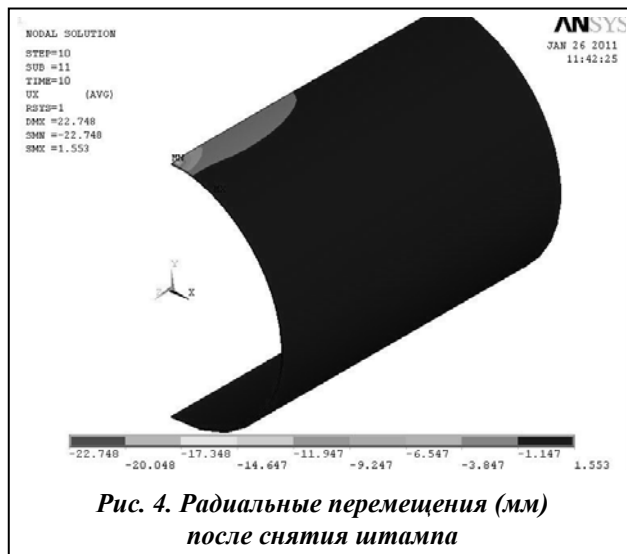


Рис. 3. Объемный 20-узловой КЭ



80 КЭ). Размеры конечных элементов были неодинаковыми – в зоне вмятины построена более мелкая сетка. В итоге в области вмятины размеры КЭ составили: $t_1 = 3,75$ мм; $t_2 = 7,3$ мм; $t_3 = 7,5$ мм (см. рис. 2).

Были рассмотрены следующие этапы деформирования обечайки: образование вмятины и нагружение допустимым давлением с последующей разгрузкой.

Заданную глубину вмятины получали, подбирая итеративным способом, величину нагрузки на индентор, таким образом, чтобы после разгрузки и упругого выпрямления оболочки образовалась необходимая глубина вмятины.

В результате воздействия индентора посередине оболочки образовалась вмятина глубиной $S = 22,49$ мм, длиной $c = 3280$ мм и шириной $b = 582$ мм. Вмятина имеет эллиптическую форму в плане, ориентированную в осевом направлении. Распределение радиальных перемещений в оболочке после снятия штампа показано на рис. 4.

Распределение интенсивности напряжений для указанных выше этапов нагружения обечайки приведены на рис. 5–8, причем величина напряжений возрастает к центру вмятины.

После образования вмятины деформированную оболочку нагружали внутренним допустимым давлением [3], с последующей разгрузкой. Допускаемое давление определялось исходя из ниже следующих положений.

При действии давления в безмоментной зоне оболочки, как известно, образуется однородное состояние с напряжениями $\sigma_\varphi = P\gamma$, $\sigma_z = 0,5\sigma_\varphi$. Поскольку радиальные напряжения $\sigma_r = P$ и они в γ раз меньше максимальных главных – σ_φ , то в соответствии с представлениями Треска–Сен-Венана, окружные напряжения являются эквивалентными напряжениями и когда они достигают значения допускаемых напряжений, то давление становится допускаемым: $[P] = [\sigma]/\gamma$.

В табл. 1 в качестве результатов расчетов приведены нормальные напряжения: окружные (σ_φ) и осевые (σ_z) на

внутренней и наружной поверхностях оболочки, в трех характерных точках (рис. 1, I – центр вмятины, II и III – точки перегиба в окружном и в осевом направлениях, соответственно). Приведены также максимальные значения интенсивности напряжений (σ_i^{\max}) и деформаций (ϵ_i^{\max}), а также перемещения в центре вмятины на разных стадиях нагружения (U_y).

Максимальные значения интенсивности напряжений и деформаций получаются на стадии образования вмятины при максимальном вдавливании штампа. При этом максимум интенсивности напряжений σ_i^{\max} не превышает значения 325 МПа, а максимальные деформации ϵ_i^{\max} составляют 9,26%.

Хотя эти напряжения и больше допускаемых напряжений в безмоментной зоне, однако они меньше допускаемых местных напряжений, рассчитанных по следующей формуле [6]:

$$\sigma_i^{\max} \leq 2,5[\sigma] = 416 \text{ МПа} . \quad (1)$$

Главные напряжения максимальны на этом этапе нагружения, однако это повышение значений напряжений носит локальный характер и, как было показано выше (1), не снижает прочность конструкции.

Интересно отметить, что на стадии образования вмятины наблюдается локальная потеря устойчивости обечайки вследствие пластического течения. При этом под штампом, в центре вмятины, снижается контактное давление и происходит смещение пятна контакта таким образом, что между вмятиной и штампом образуется незначительный зазор. После снятия нагрузки со штампа в точке I имеем остаточные сжимающие напряжения как на внутренней, так и на наружной поверхностях. При этом интенсивность остаточных напряжений (176 МПа) значительно меньше, чем максимум интенсивности по контуру вмятины (246 МПа).

После снятия штампа происходит частичное упругое выпрямление вмятины и снижение значения интенсивности деформаций от 0,4 до 8,86%. Также наблюдается некоторое перераспределение главных напряжений и снижение их величины до значения, близкого к пределу текучести (максимальная величина напряжений превышает предел текучести не более чем на 12%). Значение прогиба (глубина вмятины) в точке I составляет 22,49 мм.

При последующем нагружении внутренним допускаемым давлением [P] происходит снижение интенсивности деформаций, что связано с изменением направления нагрузки. Прогиб в центре вмятины уменьшается. Кроме того заметно некоторое повышение интенсивности напряжений и деформаций в точках II и III. Следует также отметить, что эти изменения носят локальный характер, в остальном оболочка работает по безмоментной теории.

После снятия внутреннего давления заметно снижение главных напряжений, причем в точке I происходит изменение их знака на противоположный. Интенсивность напряжений



Рис. 7. Интенсивность напряжений (МПа) при нагружении внутренним давлением

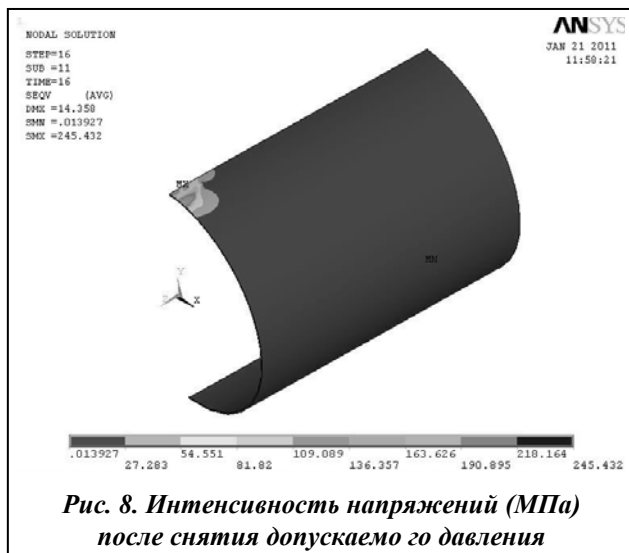


Рис. 8. Интенсивность напряжений (МПа) после снятия допускаемого давления

в точке I повысилась по сравнению с ненагруженной конструкцией. При этом в точке II наблюдается значительное снижение интенсивности напряжений до величины 170 МПа.

Значение максимума интенсивности деформаций снижается на 1,14%, по сравнению с ненагруженным состоянием, и составляет $\varepsilon_i^{\max} = 7,67\%$. Остаточный прогиб в центре вмятины равен 14,3 мм.

Таблица 1. Результаты расчета обечайки с вмятиной

Этапы нагружения	№ точки	Поверхность	σ_φ , МПа	σ_z , МПа	σ_i^{\max} , МПа	ε_i^{\max} , %	U_y , мм	
Образование вмятины	Вдавливание индентора	I	наружная	-323	-153	325	9,26	-45,8
			внутренняя	334	287			
		II	наружная	283	138	250	0,011	
			внутренняя	-289	-121			
		III	наружная	-252	-42	240	0,016	
			внутренняя	289	177			
	Разгрузка	I	наружная	-12	-16	176	8,86	-22,49
			внутренняя	-191	-190			
		II	наружная	263	248	246	0	
			внутренняя	-292	-90			
		III	наружная	280	172	245	0	
			внутренняя	-130	-271			
Допускаемое давление	Нагружение $P = [P]$	I	наружная	224	110	202	7,72	-10,3
			внутренняя	-226	-181			
		II	наружная	187	285	249	0,026	
			внутренняя	267	42			
		III	наружная	287	118	245	0,023	
			внутренняя	-210	-217			
	Разгрузка $P = 0$	I	наружная	-251	-183	235	7,67	-14,3
			внутренняя	39	86			
		II	наружная	32	182	170	0	
			внутренняя	36	-41			
		III	наружная	42	-6,5	243	0	
			внутренняя	-61	-261			

Из вышеприведенных данных следует, что под действием допускаемого давления происходит частичная рихтовка вмятины, при этом первоначальная глубина 22,49 мм уменьшается до 14,3 мм. Максимальные остаточные напряжения перераспределяются, однако их уровень существенно не изменяется и находится в пределах 170÷240 МПа, что значительно больше напряжений в безмоментной зоне, но меньше допускаемых местных напряжений, рассчитанных по формуле (1).

В процессе рихтовки, под действием давления также прослеживается снижение интенсивности деформаций, они уменьшаются до 7,67%. Хотя максимальные деформации много больше упругих, они все же являются допустимыми [5]:

$$\varepsilon_i^{\max} \leq \delta / 1,5 = 16,7 \%$$

Таким образом, прочность сосудов с вмятинами при статическом нагружении не снижается по сравнению с сосудами, не имеющими указанных дефектов формы.

Как было показано в статье [7], при последующем повышении внутреннего давления процесс рихтовки продолжается, при этом остаточные напряжения и деформации продолжают снижаться.

Высокий уровень остаточных деформаций может привести к снижению запаса пластичности. В связи с этим целесообразно выполнить исследование малоциклового прочностного состояния данной конструкции. Следует также отметить, что возникновение зон сосуда с высоким уровнем остаточных напряжений может способствовать коррозионному растрескиванию металла под напряжением [8].

Отмеченные особенности не являются предметом данной работы и не влияют на основной полученный результат – вмятины не снижают статическую прочность сосуда.

Литература

1. *Методические указания по проведению поверочных расчетов котлов и их элементов на прочность.* – М.: ДИЭКС, 1996. – 15 с.
2. *Долинский В. М.* Несущая способность тонкостенных обечаек сосудов с повреждениями стенки / В. М. Долинский, В. И. Черемская // Пробл. машиностроения. – 2009. – Т. 5, № 2. – С. 63–69.
3. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность: ГОСТ 14249–89.* – [Дата введения 01.01.90]. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 79 с.
4. *Басов К. А.* Ansys: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
5. *Посудини та апарати. Вибір параметрів зміцнювального оброблення.* – ДСТУ 4003–2000. – [Чинний від 29.12.2000]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 15 с.
6. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
7. *Кантор Б. Я.* Влияние вмятин на несущую способность сосудов / Б. Я. Кантор, В. М. Долинский, Р. Л. Онацкий // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2010. – № 14. – С. 99–106.
8. *Стеклов О. И.* Прочность сварных конструкций в агрессивных средах / О. И. Стеклов. – М.: Машиностроение. 1976. – 200 с.

Поступила в редакцию
27.12.10