

Р.Л.ОНАЦКИЙ, науч. сотр., ПАО «УкрНИИхиммаш», Харьков

ОБРАЗОВАНИЕ КРУГЛОЙ ВМЯТИНЫ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ВДАВЛИВАНИЕМ ШТАМПА

В статті розглянуто процес утворення круглої вм'ятини під дією індентора. Розрахунок виконано на основі методу скінченних елементів з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей. Проведено аналіз форми отриманих вм'ятин під дією штампів різноманітної форми.

The article describes the process of formation of circular dent under the influence of the indenter. The calculations are based on the finite element method taking into account the geometrical and physical nonlinearities. Analysis of forms are obtained dent under the influence of different forms of stamps.

В статье рассмотрен процесс образования круглой вмятины под воздействием индентора. Расчеты выполнены на основе метода конечных элементов с учетом геометрической и физической нелинейностей. Проведен анализ формы получаемой вмятины под воздействием штампов различных форм.

Сосуды и аппараты являются основными элементами технологического оборудования, эксплуатируемого на химических и нефтеперерабатывающих производствах. Наиболее распространенной формой сосуда является цилиндрическая обечайка с двумя замыкающими эллиптическими днищами.

Множество аппаратов содержат различного рода дефекты, такие как: вмятины, выпучины, овальности, трещины, при этом около десяти процентов содержат вмятины.

В результате проведенного анализа размеров и формы вмятин (наиболее характерные случаи приведены в табл. 1) были получены выводы, что в основном вмятины имеют круглую или эллиптическую формы в плане. Глубина вмятины находится в пределах $K_1 = 1 \div 2$ толщин (не учитывая огромных редких сосудов с отношением радиуса к толщине стенки $\gamma = 1072,9$) и в среднем можно принять $\gamma = 100$.

Вмятины, как правило, образуются при транспортировке и/или эксплуатации сосуда при его взаимодействии с различного рода телами, жесткость которых выше. Назовем такое тело штампом (индентором). Процесс образования вмятины на цилиндрической оболочке под действием сферического штампа был рассмотрен в работах [1, 6].

Целью данной статьи является определение формы штампа в результате вдавливания которого на цилиндрической оболочке образуется наиболее круглая вмятина.

При диагностировании вмятин дефектоскопистами, как правило, истинную форму вмятины определить затруднительно ввиду того, что вмятины располагаются не на плоских поверхностях. Поэтому форму вмятины в большинстве случаев определяют визуально. При неярко выраженных отличиях длины и ширины вмятину считают круглой, измеряя наибольший из размеров

и назначая его диаметром круглой в плане вмятины.

Как было показано в работах Кильчевского Н.А. [2], а до него Г. Герцем, в результате контактного взаимодействия упругих тел, форма поверхности которых описывается поверхностью 2-го порядка, пятно контакта, полученное при этом, будет описано в плане линией второго порядка. Исходя из этого, зная, что в большинстве случаев вмятины бывают круглыми или эллиптическими в плане, можно сделать вывод о форме штампа. Она должна быть описана поверхностью 2-го порядка. Как известно из аналитической геометрии [3] поверхностями второго порядка являются: сфера, цилиндр, конус, эллипсоид, эллиптический параболоид.

Таблица 1 – Сосуды с вмятинами

№	D , мм	h , мм	S , мм	d , мм	c , мм	b , мм	$\gamma = \frac{D}{2h}$	$K_1 = \frac{S}{h}$	$K_2 = \frac{c}{b}$
1	2000	14	9	-	300	120	71,4	0,64	2,5
2	3200	12	16	800	-	-	133,3	1,33	1
3	3772	14	15	-	1000	250	134,7	1,07	4
4	3772	14	18	-	1000	300	134,7	1,28	3,33
5	10300	4,8	125	-	1650	4375	1072,9	26,04	0,37
6	2400	8,8	7	400	-	-	136,3	0,79	1
7	4500	12	10	-	400	300	187,5	0,83	1,33
8	2400	12	16	200	-	-	100	1,33	1
9	1400	10	5,5	100	-	-	70	0,55	1
10	1400	10	9	150	-	-	70	0,9	1
11	2600	12	14	230	-	-	108,3	1,16	1
12	5000	16	50,5	1000	-	-	156,2	3,15	1

Здесь D – диаметр сосуда, h – толщина стенки, S – глубина вмятины, d – диаметр вмятины, c – длина вмятины, b – ширина вмятины, γ – коэффициент характеризующий размер сосуда, K_1 – относительная глубина вмятины, K_2 – отношение длины к ширине эллиптической вмятины.

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 [4].

Пусть глубина вмятины S является значением функции $f(x)$, зависящей от параметра x – величины необходимого перемещения штампа, после извлечения которого образуется вмятина. Для определения величины перемещения индентора запишем нелинейное уравнение относительно x :

$$F(x) = f(x) - S = 0. \quad (1)$$

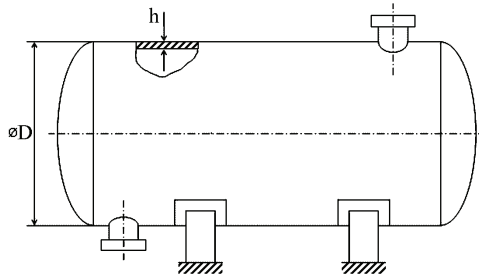


Рисунок 1 – Типовой сосуд

Для решения уравнение (1) воспользуемся итерационным методом Ньютона [7], для этого преобразуем (1) к виду (2).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)}. \quad (2)$$

Критерием окончания вычислений корня является выполнение условия $x_{n+1} - x_n < \varepsilon$, где ε – требуемая точность вычисления корня. В нашем случае $\varepsilon = 0,01$.

При образовании вмятины процесс состоял из двух этапов. На первом этапе к индентору плавно прикладывалось перемещение, увеличивая значение на каждом шаге на 1/10 от максимального значения. На втором – индентор извлекался и происходило небольшое упругое выпрямление оболочки. При этом в оболочке возникали остаточные деформации и образовывалась вмятина. Глубина вмятины была принята равной двум толщинам $S = 30$ мм.

Для начала остановимся на следующих вариантах формы штампа таких как: сфера, цилиндр (ось которого перпендикулярна оси оболочки) рис. 2, а, 2, б.

Задача решена в физически и геометрически нелинейной постановке. Физические свойства материала определяются теорией малых упруго-пластических 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.

Учтена симметрия: рассмотрена четверть оболочки, при этом на ее краях заданы условия симметрии.

Для решения задачи использовались объемные 20 - узловые конечные элементы (КЭ) с тремя степенями свободы (U_x, U_y, U_z) в каждом узле [5]. 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.

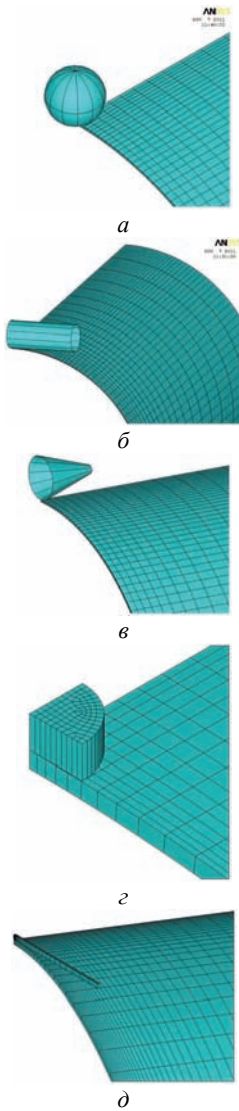


Рисунок 2 – Геометрическая модель

При выполнении расчета использовалась неоднородная конечноэлементная сетка со сгущением к центру вмятины, конечноэлементная сетка показана на 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 – 80 КЭ). Размеры конечных элементов были неодинаковые – в зоне вмятины была 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).

За границу вмятины принято значение остаточных прогибов равных 10 % от максимального значения (в центре вмятины).

Сферический индентор. Как известно [8], при контактом взаимодействии двух сфер область контакта ограничена окружностью. Поэтому для первого расчета был выбран сферический индентор диаметром $D_i = 300$ мм.

В результате воздействия сферического индентора (рис. 2, а) посередине оболочки образовалась вмятина заданной глубины $S = 30$ мм, длиной $a = 720$ мм и шириной $b = 236$ мм. Вмятина имеет эллиптическую форму в плане, с отношением $a/b = 3,05$, ориентированную в осевом направлении. Распределение радиальных перемещений в оболочке после снятия штампа показано на рис. 3. Из этого рисунка видно, что полученная эллиптическая вмятина ориентирована в осевом направлении (большая ось эллипса параллельна оси обечайки). Большее значение длины вмятины связано с большей податливостью оболочки в осевом направлении, чем в окружном. Для увеличения ширины вмятины необходимо увеличить размер штампа в направлении перпендикулярном оси оболочки. Для этого используем цилиндрический индентор.

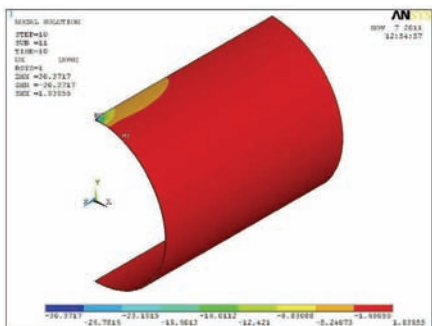


Рисунок 3 – Радиальные перемещения (мм) после снятия сферического индентора

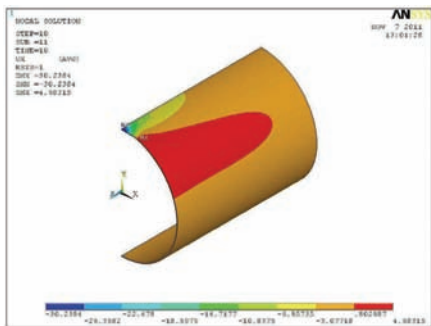


Рисунок 4 – Радиальные перемещения (мм) после снятия цилиндрического индентора

Цилиндрический индентор. Как известно, контакт между двумя скрещенными цилиндрами с одинаковыми радиусами эквивалентен контакту между шаром этого же радиуса и плоскостью [8]. В результате чего получается круговая зона контакта.

Воздействия цилиндрического индентора (ориентированного как на рис. 2, б) радиусом, равным радиусу обечайки (1500 мм), существенного изменения в необходимую сторону не дал ($a/b = 2,58$). Хотя зона контакта и представляет собой не окружность, а эллипс (с большей осью перпендикулярной оси оболочки), но все же меньшая ось эллипса достаточно велика. Это связано с тем, что радиус индентора велик. Рассмотрим цилиндрический индентор меньшего радиуса.

В результате воздействия цилиндрического индентора с диаметром $D_i = 600$ мм (рис. 2, б), ось которого перпендикулярна оси оболочки по середине оболочки, была получена вмятина глубиной $S = 30$ мм, длиной $a = 698$ мм и шириной $b = 330$ мм. Вмятина имеет эллиптическую форму в плане, с отношением $a/b = 2,11$, ориентированную в осевом направлении. Распределение радиальных перемещений в оболочке после снятия штампа показано на рис. 4.

Видно, что при уменьшении радиуса цилиндра вмятина становится все более круглой в плане, поэтому рассмотрим предельный случай. Возьмем вместо цилиндра полосу шириной в половину толщины оболочки, высотой равной толщине и длиной в половину радиуса обечайки.

Индентор в виде полосы. В результате воздействия конического индентора (рис. 2, в) была получена эллиптическая вмятина, ориентированная в осевом направлении, глубиной $S = 30,4$ мм, длиной $a = 630$ мм и шириной $b = 353$ мм. Соотношение длины к ширине $a/b = 1,78$. Распределение радиальных перемещений в оболочке после снятия штампа аналогично приведенным на рис. 4.

Конический индентор. В качестве следующей формы штампа выберем сочетание полосы и саеры, то есть конический индентор (рис. 2, *з*) с ось параллельной оси оболочки и радиусом 300 мм. В результате воздействия конического индентора, была получена вмятина глубиной $S = 29,8$ мм, длиной $a = 390$ мм и шириной $b = 240$ мм. Вмятина имеет эллиптическую форму в плане, с отношением $a/b = 1,62$, ориентированную в осевом направлении. Распределение радиальных перемещений в оболочке после снятия штампа показано на рис. 5. Изменение радиуса основания конуса мало сказывается на соотношении длины к ширине вмятины.

Рассмотрим еще один вид формы штампа – цилиндр, опирающийся своим основанием на обечайку (рис. 2, *д*). Как было показано в книге Качанова [9], при вдавливании плоского штампа в полуплоскость пластические зоны возникают по контуру основания, в этом случае после снятия штампа вмятина образованная таким штампом должна быть по форме близкой к форме линии описывающей основание штампа. То есть, в нашем случае, при вдавливании цилиндра в полуплоскость должны получать вмятину круглой формы.

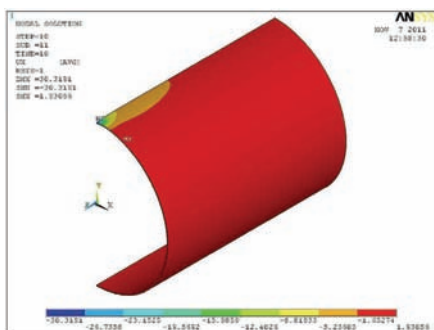


Рисунок 5 – Радиальные перемещения (мм) после снятия конического индентора

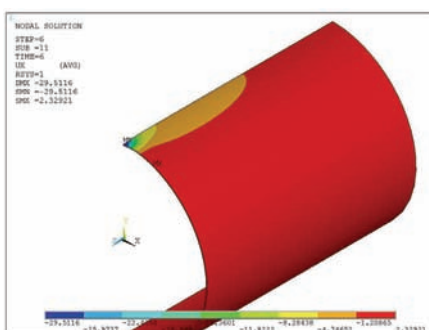


Рисунок 6 – Радиальные перемещения (мм) после снятия цилиндрического штампа с плоским основанием

Цилиндрический штамп. Рассмотрим, что получится при вдавливании плоского основания цилиндра в оболочку. После извлечения штампа на оболочке получилась вмятина эллиптической формы (см. рис. 6) с размерами: ширина 275 мм длина 550 мм глубиной 29,5 мм. Соотношение длины к ширине $a/b = 2,0$. Равномерное изменение размеров основания мало влияет на размеры вмятины. Если взять в качестве основания цилиндра не круг, а эллипс, то зафиксировав его длину (размер в осевом направлении оболочки) и увеличивая ширину, можно добиться большей округлости вмятины. Однако, в конечном итоге, наш цилиндр вырождается в полосу результат нагружения которой показан выше.

В табл. 2, приведены размеры полученных вмятин и параметр характеризующий ее форму (отношение длины к ширине вмятины).

Таблица 2 – Размеры и форма вмятины

Форма штампа	Глубина S , мм	Длина a , мм	Ширина b , мм	Отношение a/b
Сфера	30,3	720	236	3,05
Цилиндр $Ri=1500$ мм	30,1	721	279	2,58
Цилиндр $Ri=300$ мм	29,9	698	330	2,11
Полоска	30,4	630	353	1,78
Конус $Ri=300$ мм	29,8	390	240	1,62
Цилиндрический штамп* $Ri=50$ мм	29,5	550	275	2,0

*– здесь имеется ввиду цилиндрический индентор внедряющийся плоским основанием в оболочку см. рис. 2, д.

Выводы. В статье рассмотрен процесс образования вмятин на цилиндрической оболочке, представляющей собой обечайку сосуда, под действием различных инденторов. Заданная глубина вмятины была получена итеративным методом Ньютона. Оценка формы вмятины проведена по отношению длины к ширине вмятины.

В результате расчетов было установлено, что наиболее круглая вмятина была получена при вдавливании конического штампа с относительным радиусом основания $1/5$ радиуса оболочки сосуда. При этом отношение длины к ширине составило 1,62.

В остальных случаях вмятина получалась эллиптической формы с большей осью параллельной оси сосуда. Не достаточная круглость формы вмятины, возможно, связана с рассмотренной схемой образования вмятины при статическом контактом нагружении. При динамическом контактом взаимодействии это обстоятельство может измениться.

Неполноту округлости формы, также, можно объяснить разницей податливости оболочки в осевом и окружном направлениях. При увеличении толщины оболочки она становилась более жесткой и при вдавливании штампом в виде полоски и цилиндра с плоским основанием можно добиться соотношения длины к ширине вмятины 1,3.

В дальнейшем следует более детально остановиться на обобщении зависимости между жесткостью оболочки и нагрузках на штамп, необходимых для получения заданной глубины вмятины.

Список литературы: 1. Кантор Б.Я., Долинский В.М., Онацкий Р.Л. Статическая прочность нагруженных внутренним давлением тонкостенных сосудов, содержащих вмятины // Проблемы машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 38-43. 2. Кильчевский Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320 с. 3. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1973. – 872 с. 4. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расче-

та на прочность: ГОСТ 14249–89. – Введ. 01.01.90. – М.: Изд. стандартов, 1989. – 79 с. **5.** Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с. **6.** Кантор Б. Я., Долинский В. М., Онацкий Р. Л. Влияние вмятин на несущую способность сосудов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 14. – С. 99. **7.** Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с. **8.** Johnson K. L. Contact mechanics // Cambridge University Press. – 6. – Nachdruck der 1. Auflage, 2001. **9.** Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

Поступила в редколлегию 17.10.2011.