

Б.Я. КАНТОР, д-р техн. наук, профессор, ИПМаш НАН Украины, Харьков;

А.Н. ШУПИКОВ, д-р техн. наук, профессор, ИПМаш НАН Украины, Харьков;

Р.Л. ОНАЦКИЙ, науч. сотр., ХФ ПАО «Укрнефтехимпроект», Харьков

ВМЯТИНА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ, ОБРАЗОВАННАЯ УДАРОМ

В статті розглянуто процес утворення вм'ятини на циліндричній оболонці ударом сфери. Виконано співставлення напружень й деформацій у зоні вм'ятини, яка утворена ударом, а також статичною контактною взаємодією. Розв'язання проведено на основі методу скінчених елементів, з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності.

Ключові слова: циліндрична оболонка, вм'ятина, фізична та геометрична нелінійність.

В статье рассмотрен процесс образование вмятины на цилиндрической оболочке ударом сферы. Выполнено сопоставление напряжений и деформаций в зоне вмятины образованной ударом и статическим контактным взаимодействием. Решение проведено на основе метода конечных элементов, с учетом физической и геометрической нелинейности.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, вмятина, физическая и геометрическая нелинейность.

There was described the process of the formation of dent on the cylindrical shell by sphere impact. It was made a comparison of the stresses and strains formed by the impact and static contact interaction in the area of dent. The solution was made on basis of the finite-element analysis, with an allowance for physical and geometric nonlinearity.

Keywords: cylindrical shell, dent, physical and geometric nonlinearity.

Введение. Вмятина является очень распространенным дефектом, часто встречающимся на цилиндрических оболочках таких как, сосуды, работающие под давлением, эксплуатируемые на химических и нефтеперерабатывающих производствах.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) в цилиндрической оболочке с вмятиной образованной статическим вдавливанием штампа было широко рассмотрено в статьях [1, 3, 4]. Процесс образование вмятин под действием различных штампов рассмотрен в статье [2].

Зачастую, вмятины образуются в результате удара различных твердых предметов о стенку оболочки, в этом случае НДС в оболочке, очевидно, будет несколько иным по сравнению с квазистатическим контактным взаимодействием оболочки и штампа, как рассматривалось ранее [1-4]. Поэтому целесообразно провести сопоставление напряжений и деформаций для этих двух случаев.

Целью данной статьи, является рассмотрение процесса образования вмятины под действием динамической нагрузки – удара штампа об оболочку. При этом необходимо выполнить сравнение полученного НДС в области вмятины для динамического и квазистатического контактного взаимодействия цилиндрической оболочки и индентора.

Постановка задачи. Моделирование вмятины двумя ранее отмеченными способами выполним с помощью метода конечных элементов в конечно-элементном комплексе ANSYS.

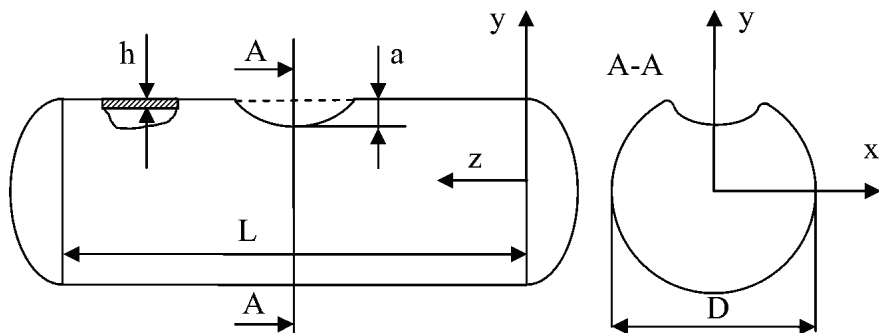


Рисунок 1 – Расчетная схема сосуда с вмятиной

Расчетная схема представляет собой цилиндрическую оболочку, замкнутую двумя полусферическими днищами. Общая длина цилиндрической оболочки $L = 7000$ мм, диаметр $D = 3000$ мм, толщина $h = 15$ мм. Материал сосуда сталь Ст3, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, модуль упрочнения $E_T = 2 \cdot 10^3$ МПа (использовалась схематизация диаграммы растяжения диаграммой с линейным упрочнением), предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 460$ МПа, предельная деформация $\varepsilon_B = 0.25$ [9].

Поскольку нас интересуют напряжения и деформации в локальной зоне вмятины, целесообразно оставить в рассмотрении 1/8 часть сосуда и полагать, что вмятина образуется симметрично с двух сторон оболочки. Конечно-элементная модель оболочки показана на рис. 2.

В качестве штампа (или ударника для случая динамического процесса) будем использовать сферический индентор радиус, которого равен 1/10 радиуса цилиндра.

Вмятина, образованная ударом. Рассмотрим процесс образования вмятины посредством удара жесткого, сферического индентора радиусом 150 мм и массой 110 кг со скоростью $V = 0.6$ м/с.

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

Для решения динамической задачи использовались объемные 8 - узловые конечные элементы (КЭ) с 9 степенями свободы ($UX, UY, UZ, VX, VY, VZ, AX, AY, AZ$) в каждом узле [7] – по три компоненты перемещений, скорости, и ускорения. Выбор объемных КЭ основан на том, что на этапе образования вмятины в зоне вдавливания штампа возникает объемное напряженно-деформированное состояние. В зоне контакта индентора и оболочки были использованы контактные элементы, моделирующие «жестко-податливый» контакт типа поверхность-поверхность.

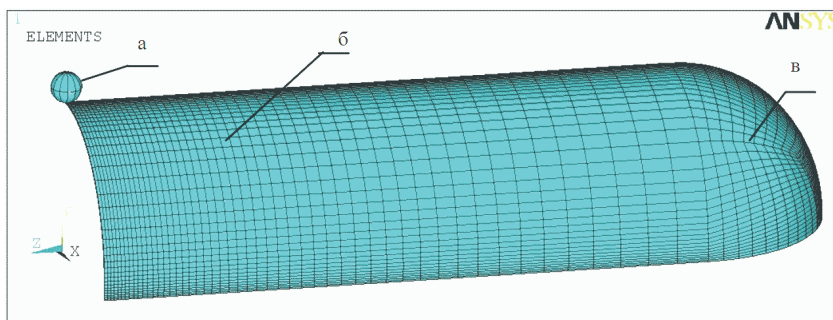


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель 1/8 части сосуда:
a – индентор; *b* – обечайка; *в* – днище

На рис. 3 приведен график изменения по времени перемещений области контакта индентора и цилиндрической оболочки.

Из рисунка видно, что максимальный прогиб $W_y = 77,2$ мм, получаем на 0,27 с после столкновения индентора и цилиндра. После этого ударник отскакивает от оболочки и прогиб в ней постепенно уменьшается до величины 51 мм.

На рис. 4 приведено изменение во времени максимума пластических деформаций в центре вмятины. Из рисунка, видно, что деформации стремительно возрастают вплоть до 0,27 секунды после чего остаются на уровне $\varepsilon = 0,056$.

На рис. 5 показан график изменения контактной силы во времени. Форма полученной вмятины эллиптическая в плане с длиной и шириной 3030 на 634 мм соответственно. Это хорошо согласуется с известными результатами Кильчевского Н.А. [5] и Г. Герца о том, что при контактном взаимодействии тел, поверхность которых описана поверхностями 2-го порядка, пятно контакта, полученное при этом, граница будет описана в плане линией второго порядка.

Вид сверху на оболочку с вмятиной показан на рис. 6. На рис. 7 приведено распределение интенсивности остаточных напряжений в области вмятины (вид сверху).

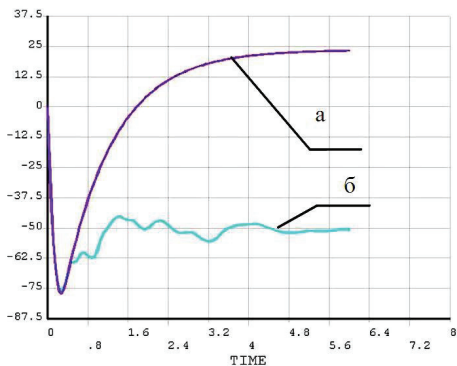


Рисунок 3 – Перемещение (мм) точек контакта: *a* – индентора, *б* – оболочки

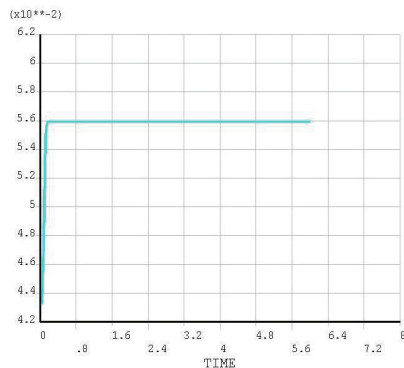


Рисунок 4 – Изменение максимума пластических деформаций

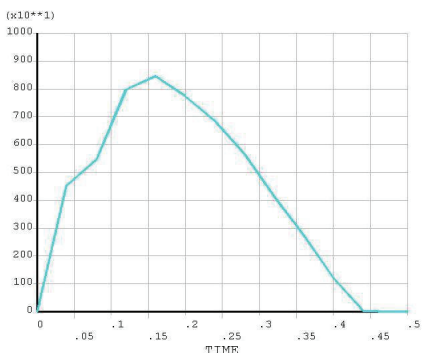


Рисунок 5 – График изменения контактной силы (Н) по времени

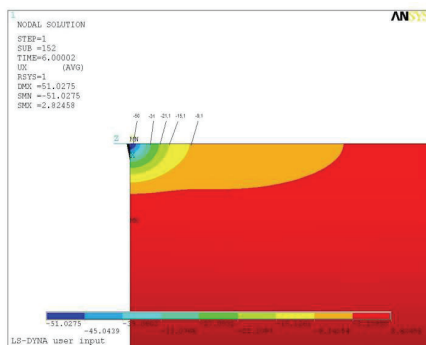


Рисунок 6 – Радиальные перемещения оболочки (мм) после образования вмятины

Вмятина образованная статическим контактным взаимодействием.

Рассмотрим процесс образования вмятины посредством статического вдавливания жесткого штампа сферической формы, с таким же радиусом 150 мм. Задача, как и ранее, решена в физически и геометрически нелинейной постановке. Физические свойства материала определяются теорией малых упруго-пластических деформаций с линейным кинематическим упрочнением. Геометрические размеры оболочки аналогичны приведенным выше.

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

Для решения статической задачи были использованы объемные 8 - узловые конечные элементы (КЭ) с тремя степенями свободы (U_x , U_y , U_z) в каждом узле [7]. Выбор объемных КЭ основан на том, что на этапе образования вмятины в зоне вдавливания штампа возникает объемное напряженно-деформированное состояние. В зоне контакта индентора и оболочки были

использованы контактные элементы, моделирующие «жестко-податливый» контакт.

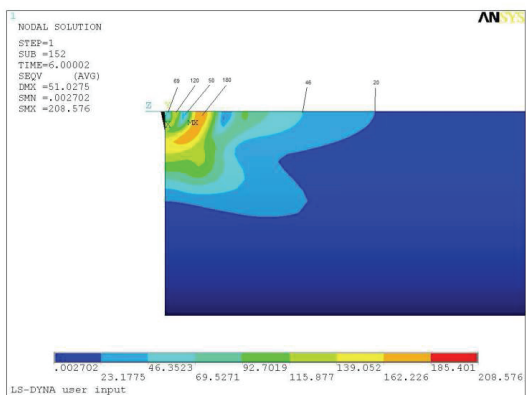


Рисунок 7 – Интенсивность остаточных напряжений МПа

При выполнении расчета использовалась неоднородная конечно-элементная сетка со сгущением к центру вмятины, конечно-элементная сетка показана на рис. 2.

Нагружение штампа проводилось, плавно увеличивая перемещения до величины, при которой после снятия его остаточные перемещения составили бы заданную глубину вмятины (51 мм). Определение необходимой нагрузки на штамп выполнено итеративным методом Ньютона [8]. Более подробно процесс образования вмятины вдавливанием штампа рассмотрен в статье [2]. В результате, чтобы получить вмятину глубиной 50,2 мм после разгрузки (см. рис. 7) нам потребовалось вдавить штамп на глубину $W_c = 90,6$ мм, что на 18,5 мм больше чем для случая удара.

Проведем оценку НДС после извлечения штампа. На рис. 8 показано распределение интенсивности остаточных напряжений в оболочке с вмятиной. Максимум интенсивности напряжений 251,5 МПа, что на 43 МПа больше чем для случая удара.

Распределение остаточных деформаций мало отличается от случая удара, однако, максимальные значения интенсивности пластических деформаций в случае статического контактного взаимодействия ($\epsilon_i = 0,126$) на 7 % больше интенсивности пластических деформаций полученных при ударе.

Выводы. Сопоставляя результаты, полученные для двух способов образования вмятин, на цилиндрической оболочке, можно сделать следующие выводы.

1. В целом форма полученных вмятин мало отличается друг от друга, однако, в случае удара вмятина получается более круглой в плане.

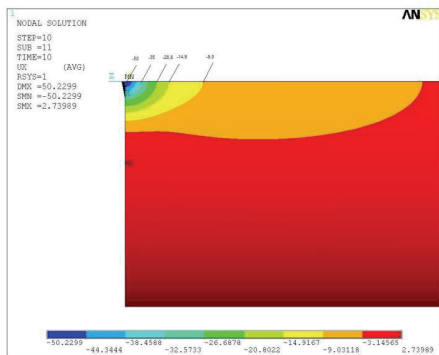


Рисунок 8 – Радиальные перемещения оболочки (мм) после образования вмятины

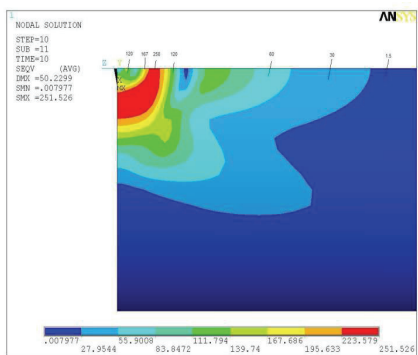


Рисунок 9 – Интенсивность остаточных напряжений (МПа)

2. Чтобы получить вмятину одинаковой глубины, для случая статического контактного взаимодействия необходимо вдавить штамп на 17 % глубже, чем при ударе (то есть $W_c = W_y \cdot 1,17$), что вызывает увеличение остаточных деформаций на 7 %.

3. Уровень остаточных напряжений, также, получаются больше в случае квазистатического контактного взаимодействия.

Таким образом, в оболочках с вмятиной, образованной ударом, напряжения и деформации меньше, чем в оболочках с вмятинами образованными статическим контактным взаимодействием.

Список литературы: 1. Кантор Б.Я. Статическая прочность нагруженных внутренним давлением тонкостенных сосудов, содержащих вмятины / Б.Я. Кантор, В.М. Долинский, Р.Л. Онацкий // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 38-43. 2. Р.Л. Онацкий. Образование круглой вмятины на цилиндрической оболочке вдавливанием штампа // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – № 63. – С. 106-113. 3. 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. 4. Р.Л. Онацкий. Остаточные напряжения в сосудах с вмятинами и снятие их в процесс гидрообработки // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2011. – № 52. – С. 135-141. 5. Кильчевский Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар / Н. А. Кильчевский. – К.: Наук. думка, 1976. – 320 с. 6. Дж. А. Зукас. Динамика удара / Дж. А. Зукас, Т. Николас, Х.В. Свифтидр. – М.: Мир, 1985. – 296 с. 7. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с. 8. Самарский А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М.: Наука. 1989. – 432 с. 9. Писаренко. Г.С. Справочник по сопротивлению материалов : 2-е изд. –К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.

Поступила в редколлегию 16.10.2012