

Такая схема достаточно обеспечивает линейризацию тягового усилия ЭМВ.

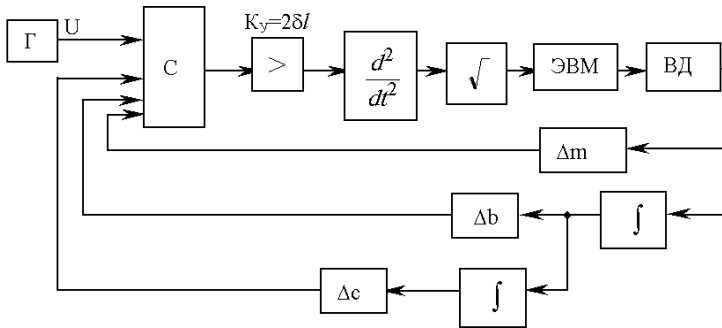


Рис.2

**Список литературы:** 1. Божко А.Е., Иванова З.А., Личкатый Е.А. Резонансный метод идентификации параметров колебательной системы с двумя степенями свободы. // Проблемы машиностроения, 2000. – Т 3-4. – С. 56-61. 2. Божко А.Е., Белых В.И., Мякохлеб К.Б. Улучшение функциональных возможностей электромагнитных вибростендов. // Доповіді НАН України, 2001. – № 10. – С. 100-103. 3. Божко А.Е. О формировании управления электромагнитными виброизбудителями. // Доповіді НАН України, 2002. – № 2. – С. 99-102. 4. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989.

*Поступила в редколлегию 20.04.02*

УДК 539.3

**С.В.БОНДАРЬ**, канд.техн.наук, **Д.В.ЛАВИНСКИЙ**, канд.техн.наук

### **КОНТАКТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ОПЕРТОЙ НА РАДИАЛЬНОЕ КОЛЬЦО**

Проведено моделювання контактної взаємодії циліндричної оболонки із радіальним кільцем. Надано порівняння результатів чисельного рішення методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу SPACE-T з даними аналітичного рішення.

Технологические операции по изготовлению различных деталей, основанные на способности металлов пластически деформироваться, нашли широкое применение в различных отраслях современной промышленности. Помимо традиционных методов обработки металлов давлением (ОМД), в которых деформирование осуществляется путем контакта заготовки и пуансона, все более популярными становятся “бесконтактные” методы. Такие методы должны применяться, когда недопустимым является загрязнение поверхности обрабатываемой заготовки чужеродными примесями. К “бесконтактным” от-

носится магнитно-импульсная штамповка (МИШ), основанная на принципах магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ). Одной из перспективных областей применения является использование МИШ для обработки тонкостенных конструкций [1].

При разработке нового вида указанных технологических операций важное место занимает анализ напряженно-деформированного состояния заготовки и технологической оснастки для определения оптимальных технологических параметров. На этом этапе наибольшие трудности у исследователей вызывает решение задачи контактного взаимодействия. В случае использования МИШ контактное взаимодействие присутствует между заготовкой и матрицей (уровень развития оборудования для МИШ не позволяет пока совершать операции безматричной штамповки). Учет контактного взаимодействия может быть проведен путем введения слоя специальных контактных элементов, которые позволяют свести нелинейность контактной задачи к внутренней нелинейности слоя. Именно такой алгоритм реализован в конечно-элементном программном комплексе SPACE-T [2]. В этом комплексе существует возможность анализа НДС конструкций в рамках объемной и двумерной постановок.

Исследование НДС тонкостенных конструкций требует учета того обстоятельства, что у них одно измерение значительно меньше двух других. Для анализа НДС тонкостенных конструкций разработаны специальные методы, а при решении методом конечных элементов используют специальные оболочечные или пластинчатые элементы, например в известном программном комплексе COSMOS/M [3] это SHELL элементы. В то же время геометрия конструкции и условия нагружения позволяют рассматривать некоторые задачи деформирования оболочек в осесимметричной постановке.

В данной статье выполнено исследование НДС цилиндрической оболочки, взаимодействующей с радиальным кольцом, в рамках осесимметричной постановки задачи для тел вращения. Задача решается для расчетной схемы представленной на рис. 1а.

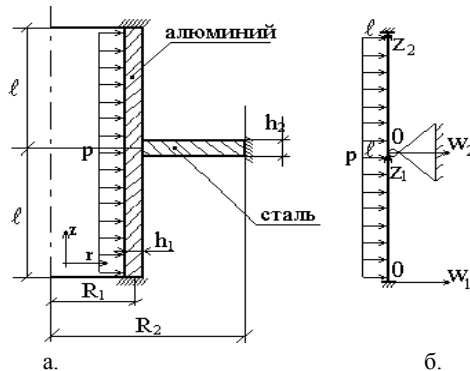


Рис.1. Расчетная схема

Для данной задачи может быть построена эквивалентная схема, описывающая осесимметричный изгиб цилиндрической оболочки, защемленной на торцах и подкрепленной по середине шарниром – рис.1б, причем решение такой задачи может быть получено аналитически. Конструкция имела следующие геометрические параметры:  $\ell = 0,5$  м;  $R_1 = 0,5$  м;  $R_2 = 0,7$  м;  $h_1 = 0,01$  м;  $h_2 = 0,02$  м. Цилиндр принимался из алюминия:  $E = 6,5 \cdot 10^{10}$  Па;  $\nu = 0,33$ , а кольцо из стали:  $E = 2,11 \cdot 10^{11}$  Па;  $\nu = 0,27$ . Цилиндрическая оболочка считалась нагруженной внутренним давлением 1 Па. Параметры цилиндра позволяют рассматривать его как тонкую оболочку ( $h_1/R_1 = 1/50 < 1/30$ ) [4]. Тогда осесимметричный изгиб оболочки описывается следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$\frac{d^4 w}{d\xi^4} + 4w = \frac{p}{\alpha^4 D}, \quad (1)$$

где  $w$  – функция прогиба,  $\xi = \alpha z$  – безразмерная координата,  $D = \frac{Eh_1^3}{12(1-\nu^2)}$  – цилиндрическая жесткость,  $\alpha = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 h_1^2}}$ . Для приведенной расчетной схемы функцию прогиба можно отыскивать независимо на двух участках между защемлениями и шарниром. На каждом из участков прогиб имеет следующий вид:

$$w = C_1 Y_1 + C_2 Y_2 + C_3 Y_3 + C_4 Y_4 + \frac{p}{4\alpha^4 D}, \quad (2)$$

где  $C_i$  – произвольные постоянные,  $Y_i = Y_i(\xi)$  – функции Крылова. Для определения констант необходимо использовать граничные условия, которые представляют следующее.

В заделке равны нулю прогиб и угол поворота:

$$\begin{cases} w_1(0) = 0; \varphi_1(0) = \frac{dw_1}{dz} = 0; \\ w_2(\ell) = 0; \varphi_2(\ell) = \frac{dw_2}{dz} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

На в сечении, где расположен шарнир, условия следующие:

$$\begin{cases} w_1(\ell) = 0; M_{z1}(\ell) = -D \frac{d^2 w_1}{dz^2} = 0; \\ w_2(0) = 0; M_{z2}(0) = -D \frac{d^2 w_2}{dz^2} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Откуда окончательно функции прогиба на каждом из участков выглядит следующим образом:

$$w_2 = -\frac{p}{4\alpha^4 D} Y_1 + \frac{(p/4\alpha^4 D) Y_2(\alpha\ell)(Y_1(\alpha\ell)-1) + (p/\alpha^4 D) Y_3(\alpha\ell) Y_4(\alpha\ell)}{Y_2(\alpha\ell) Y_3(\alpha\ell) - Y_1(\alpha\ell) Y_4(\alpha\ell)} Y_3 - \frac{(p/4\alpha^4 D) Y_1(\alpha\ell)(Y_1(\alpha\ell)-1) + (p/\alpha^4 D) Y_3^2(\alpha\ell)}{Y_2(\alpha\ell) Y_3(\alpha\ell) - Y_1(\alpha\ell) Y_4(\alpha\ell)} Y_4 + \frac{p}{4\alpha^4 D}. \quad (5)$$

$$w_2 = -\frac{p}{4\alpha^4 D} Y_1 + \frac{(p/4\alpha^4 D)Y_3(\alpha\ell)(Y_1(\alpha\ell)-1) + (p/\alpha^4 D)Y_4^2(\alpha\ell)}{Y_2(\alpha\ell)Y_3(\alpha\ell) - Y_1(\alpha\ell)Y_4(\alpha\ell)} Y_2 - \frac{(p/4\alpha^4 D)Y_1(\alpha\ell)(Y_1(\alpha\ell)-1) + (p/\alpha^4 D)Y_2(\alpha\ell)Y_4(\alpha\ell)}{Y_2(\alpha\ell)Y_3(\alpha\ell) - Y_1(\alpha\ell)Y_4(\alpha\ell)} Y_4 + \frac{p}{4\alpha^4 D}. \quad (6)$$

Численно задача была решена при помощи программного комплекса SPACE-T. Система моделировалась плоскими четырехузловыми конечными элементами с билинейной аппроксимацией перемещений. Было проведено два расчета для оценки точности получаемых результатов. В первом расчете система имела 2106 степеней свободы, при этом в зоне контакта находилось 10 конечных элементов, во втором случае система имела 4212 степеней свободы и 20 элементов соответственно в зоне контакта. Оказалось, что увеличение числа конечных элементов не ведет к значительным изменениям результата. Так максимальные перемещения для уточненной модели изменились всего на 0,1%. Таким образом, результаты первого расчета могут считаться достоверными, и все дальнейшие рассуждения приведены для этого случая. Что касается размеров площадки контакта, то следует отметить, что используемый метод контактного слоя позволяет определять размеры контактных площадок с точностью до конечного элемента. В данном случае в первом расчете в контакте оказались 2 крайних конечных элемента, а во втором – 4 соответственно, если учесть, что во втором случае размеры конечных элементов уменьшились в два раза, то и при анализе контактного взаимодействия можно опираться на результаты первого расчета.

На рис.2 представлено деформированное состояние конструкции



Рис.2. Деформированное состояние

Далее сравним результаты численного и аналитического решений. На рис.3 построены в одинаковом масштабе графики аналитического решения по формулам (5) и (6) (сплошная линия) и узловых значений перемещения  $u_z$ , полученных при использовании программного комплекса SPACE-T (кружки). При этом наблюдается удовлетворительное совпадение результатов. Численное решение дает несколько завышенные максимальные перемещения (в среднем: 1,5 – 2%), что является приемлемым при проведении инженерных расчетов.

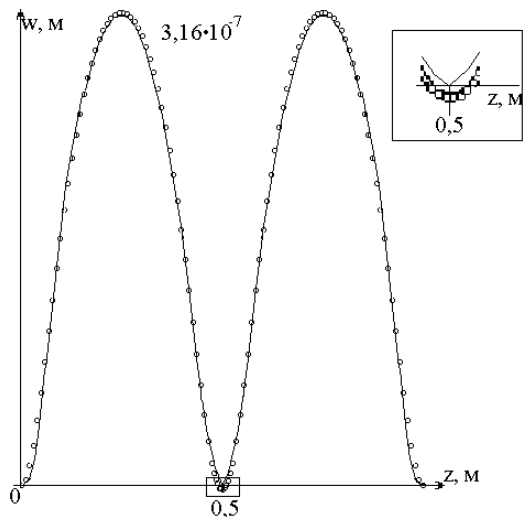


Рис.3. Сравнение данных аналитического и численного решений

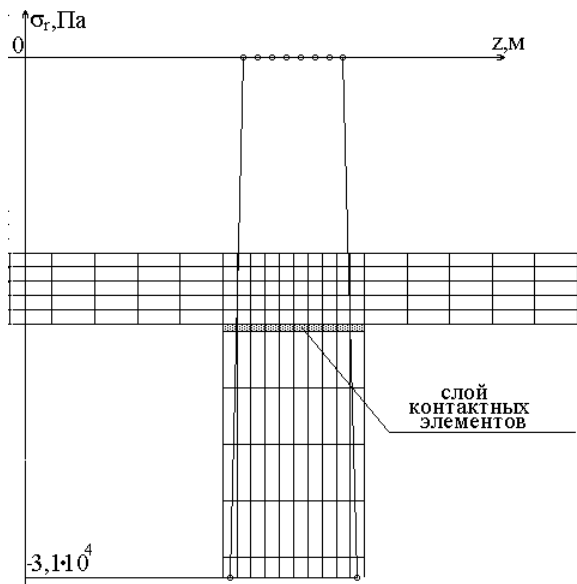


Рис.4. Нормальные напряжения в зоне контакта

Наибольшие расхождения наблюдаются в зоне опирания оболочки на кольцо. Помимо ожидаемых расхождений в размерах области нулевых перемещений оболочки, так как конечная площадка контакта в аналитическом решении была заменена бесконечно малой площадкой – точкой, в которой по-

мешался шарнир, оказалось, что часть узлов в контактной зоне переместились в направлении противоположном общим перемещениям оболочки. То есть оказалось, что часть элементов вышла из контакта. Проверить это утверждение можно, если рассмотреть изменение нормальных напряжений вдоль линии контакта. В данном случае в выбранной системе координат нормальными являются напряжения  $\sigma_r$ , график значений которых в центрах контактных конечных элементов представлен на следующем рисунке. Из графика видно, что в контакте при деформировании остаются только крайние элементы, в узлах других контактных элементов нормальные напряжения равны нулю, т.е. в пределах этих элементов после деформирования оболочка и кольцо не контактируют.

В целом следует отметить, что проведенный анализ свидетельствует о возможности применения программного комплекса SPACE-T для анализа контактного деформирования осесимметричных тонкостенных тел вращения.

**Список литературы:** 1. *Батыгин Ю.В., Лавинский В.И.* Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Харьков: МОСТ – Торнадо, 2002. – 288 с. 2. *Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И.* Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // *Динамика и прочность машин.* – 2000. - №57, С. 24-34. 3. *M.Lashkari, Ph.D.* COSMOS/M User Guide. Stress, Vibration, Buckling, Dynamics, and Heat Transfer Analyses (Release Version 1.52).-S.R.A.C.- Santa Monica, California, 1988.- 231p. 4. *Самуль В.И.* Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высш. школа, 1982. – 264с.

*Поступила в редколлегию 29.04.02*

УДК 534.1:533.9

**К.В. ВАКУЛЕНКО; А.В. КОЛОДЯЖНЫЙ**, канд.техн.наук;  
**С.Ю. СОТРИХИН**, канд.техн.наук; ИПМаш НАН Украины

### **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ ТОЛСТЫХ ПРОВОДНИКОВ**

Приведена одновимірна задача електричного вибуху циліндричних дротин при наявності шарів з різноспрямованими струмами. За критерій руйнування прийнято динамічний деформаційний критерій міцності.

С развитием новых направлений в современной технике, большой интерес представляет применение явления электрического взрыва проводников (ЭВ) [1,3]. Несмотря на наличие достаточного количества теорий и большого числа экспериментов, физика явления ЭВ проводников все еще недостаточно полно изучена, особенно для толстых проводников. Это не позволяет выбирать оптимальные параметры технологических процессов.