

Численное моделирование процесса осесимметричного гидравлического выпучивания тонкого закрепленного по контуру металлического листа

к.т.н. доц. Петров В.К., д.т.н. проф. Сухомлинов Л.Г.

Университет машиностроения

8(495)223-05-23, доб. 1318, tm@mami.ru

Аннотация. Излагаются результаты применения осесимметричной жесткопластической без моментной конечно-элементной модели к исследованию формоизменения тонкого, закрепленного по контуру металлического листа под действием гидростатического давления. Дается сравнение с известными численными решениями и экспериментальными данными.

Ключевые слова: осесимметричная жесткопластическая без моментная конечно-элементная модель, металлический лист, свободное гидравлическое выпучивание, предельное формоизменение

Достаточно распространенной в процессах холодной листовой штамповки является операция, при которой формоизменение закрепленной по контуру круглой заготовки из листового металла осуществляется под действием гидростатического давления (рисунок 1). В подобном процессе гидроформовки давление рабочей жидкости в течение некоторого промежутка времени растет, достигая своего предельного значения, а затем падает. При этом разрыв формующей оболочки (в случае высокопластичного материала) обычно реализуется на запредельной стадии деформирования. Расчетным путем предельное и запредельное поведение формующей указанном образом оболочки еще недостаточно изучено. Основная проблема здесь в обеспечении получения надежных числовых результатов при моделировании процесса формоизменения оболочки в запредельной области. Представленная в работах [1, 2] осесимметричная жесткопластическая безмоментная конечноэлементная модель обладает отмеченной вычислительной надежностью, о чем можно судить по результатам ее применения, изложенным в работах [1-5]. В настоящей статье вычислительная модель [1, 2] применяется к исследованию обсуждаемого процесса гидроформовки, включая и его запредельную стадию.

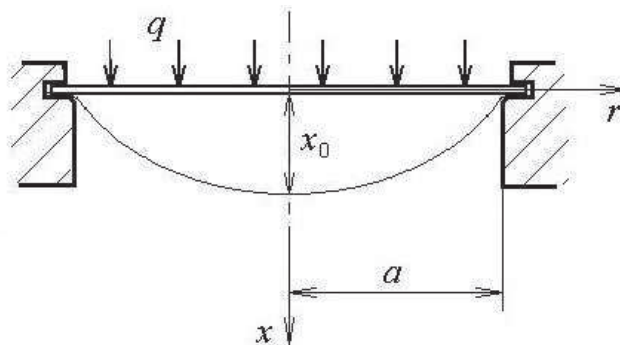


Рисунок 1. Схема процесса свободного гидравлического выпучивания

Краткое описание этой модели применительно к рассматриваемому случаю выглядит следующим образом.

Предполагаем, что формующая из листового металла под действием гидростатического давления осесимметричная оболочка является настолько тонкой, что ее допустимо считать безмоментной. Упругими деформациями на фоне больших пластических деформаций пренебрегаем, считая материал оболочки жесткопластическим. При этом используем предложенный Р. Хиллом [6] вариант теории течения (квадратичный критерий текучести) для трансверсально изотропного материала с изотропным упрочнением. Образующую рассматриваемой оболочки в ее исходном недеформированном состоянии разбиваем на достаточно большое

количество N участков малых размеров с тем, чтобы в течение всего процесса формоизменения можно было бы считать эти участки прямолинейными. Процесс деформирования подобной безмоментной оболочечной модели, состоящей из указанных N элементов с прямолинейными образующими, рассматриваем как пошаговый, при котором переход из известного состояния в момент времени t в новое состояние (в момент времени $t + \Delta t$), осуществляется с малыми приращениями деформаций. На данном малом временном интервале Δt (шаге нагружения) формулировку задачи для принятой дискретной модели оболочки выполняем в терминах узловых перемещений с учетом изменения конфигурации оболочки за время Δt . При этом используем цилиндрическую систему координат (x, r, φ) .

Решение сформулированной физически и геометрически нелинейной задачи для дискретной модели оболочки на шаге нагружения сводится посредством итерационной процедуры к решению последовательности линейных задач. Линеаризация исходной нелинейной системы уравнений на шаге нагружения в рамках такой процедуры осуществляется с использованием методов Ньютона и переменных параметров упругости. Итерационные уточнения выполняются до достижения заданной относительной точности ($\delta_{от}$) по перемещениям. Решение соответствующей системы линейных алгебраических уравнений проводится по методу Гаусса.

Следует отметить, что в качестве параметра нагружения при реализации описанной вычислительной модели принималось перемещение x_0 полюса формуемой оболочки. Давление q при этом являлось вычисляемым параметром. Подобный подход обеспечивает устойчивый счет при численном моделировании рассматриваемого процесса гидроформовки с заходом в упомянутую выше запредельную область.

Перейдем теперь к результатам исследований с применением описанной конечноэлементной модели. Сначала остановимся на результатах, подтверждающих надежность данной модели при решении рассматриваемого класса задач. Будем при этом использовать экспериментальные и расчетные данные работ [7, 8].

В работе [7] приведены данные по гидравлическому выпучиванию круглых заготовок из листовой меди толщиной $h = 0,0365 \text{ in}$ (0,927 мм) с радиусом $a = 5,0 \text{ in}$ (127 мм). Коэффициент нормальной анизотропии R указанного материала равен единице (изотропный материал), а его кривая упрочнения представима в виде:

$$\sigma = A(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad (1)$$

где: $A = 444 \text{ МПа}$, $\varepsilon_0 = 0,0097$, $n = 0,344$.

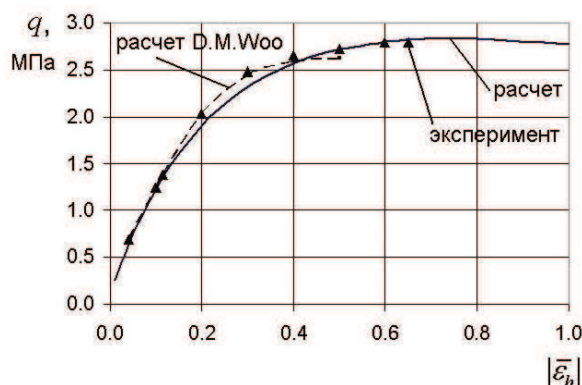


Рисунок 2. Зависимость гидростатического давления от толщины деформации в полюсе оболочки в случае $n = 0,344$, $R = 1,0$

Расчеты по предлагаемой модели проводились с числом элементов $N = 400$, с шагом $\Delta x_0 = a/4000$ по параметру нагружения и при выборе $\delta_{от} = 0,0001$. О хорошем согласовании результатов такого конечноэлементного расчета с экспериментом позволяют судить данные,

представленные на рисунке 2. Здесь $\bar{\varepsilon}_h$ – толщинная логарифмическая деформация в полюсе оболочки. Вместе с тем, расчетная модель [7], построенная как и предлагаемая конечноэлементная модель на основе теории течения для материала с изотропным упрочнением, демонстрирует неустойчивый счет по мере приближения к предельному значению параметра q .

В работе [8] рассмотрено решение задачи о гидровыпучивании круглой мембраны на основе теории течения и деформационной теории. Показано, что расчетная модель, построенная с использованием соотношений теории течения, лучше согласуется с экспериментом, особенно в ситуациях, близких к предельным. Приведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными Брамлеем и Меллором в 1965 году. В указанных экспериментах использовались заготовки из листовой стали толщиной $h = 0,04 \text{ in}$ (1,016 мм) с радиусом $a = 5,0 \text{ in}$ (127 мм).

Коэффициент нормальной анизотропии данного материала определен в виде $R = 1,4$, а его кривая упрочнения в виде:

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^n, \quad (2)$$

где: $A = 534 \text{ МПа}$, $n = 0,246$.

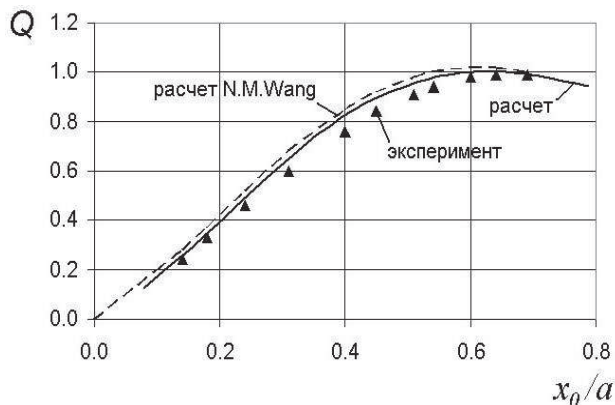


Рисунок 3. Зависимость безразмерного параметра нагрузки от относительного перемещения полюса оболочки

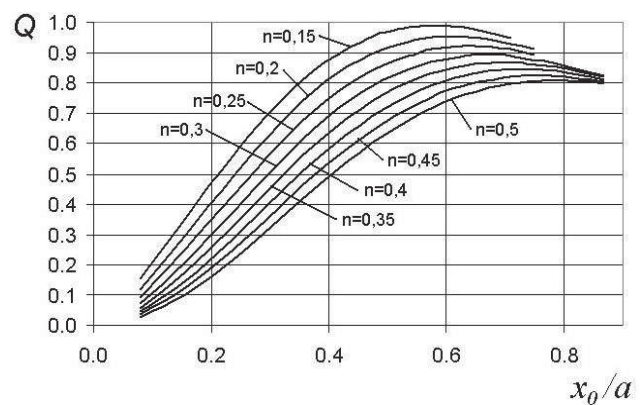


Рисунок 4. Зависимости безразмерного параметра нагрузки от относительного перемещения полюса для разных значений показателя n кривой упрочнения

На рисунке 3 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных, приведенных в работе [8], с результатами расчета с использованием разработанной конечноэлементной модели. Здесь безразмерный параметр нагрузки Q определяется формулой:

$$Q = \frac{q \cdot a}{h \cdot A}, \quad (3)$$

где: h – исходная толщина листового металла.

Как видно, результаты расчета на основе предлагаемой конечноэлементной модели лучше согласуются с экспериментальными данными, чем аналогичные результаты, полученные на основе расчетной модели [8]. Отмечаем также, что разработанная модель демонстрирует устойчивый счет на любой стадии процесса формоизменения, в том числе и в предельной области.

Перейдем теперь к изложению результатов параметрических исследований, выполненных с применением предлагаемой конечноэлементной модели. Листовой материал при проведении таких исследований предполагался изотропным ($R = 1$). Показатель n кривой упрочнения, задаваемой в виде (2), варьировался в пределах от 0,15 до 0,5 с шагом 0,05.

На рисунке 4, 5, 6 приведены зависимости безразмерных параметров Q , $(S - S_0)/S_0$, $\bar{\varepsilon}_h$ (соответственно) от относительного перемещения x_0/a полюса формируемой оболочки для упомянутых (восьми) значений показателя n кривой упрочнения листового металла. Здесь

Q – безразмерный параметр нагрузки, определяемый формулой (3); S_0 и S – значения площади поверхности оболочки в ее исходном (плоском) и текущем (деформированном) состояниях; $\bar{\varepsilon}_h$ – толщинная логарифмическая деформация в полюсе оболочки.

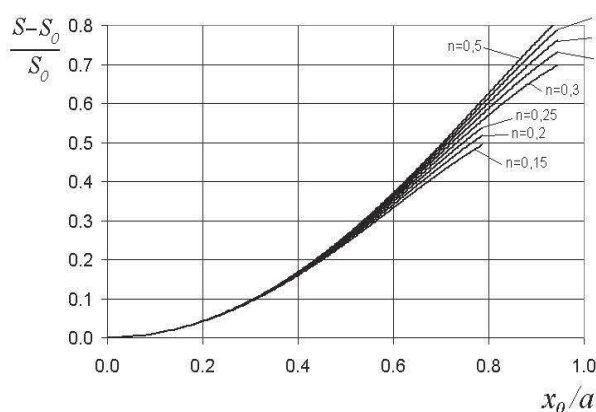


Рисунок 5. Зависимости относительного увеличения площади поверхности от относительного перемещения полюса для разных значений показателя n кривой упрочнения

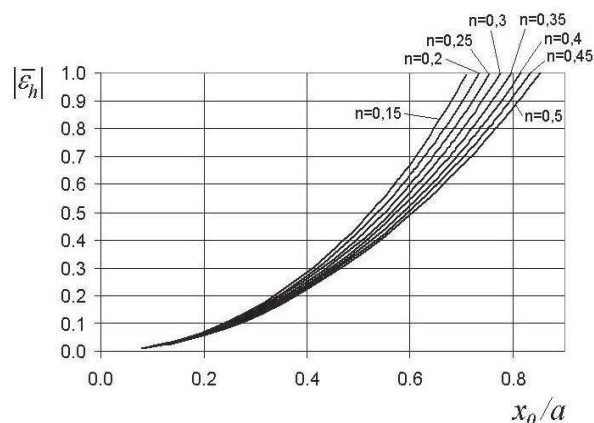


Рисунок 6. Зависимости толщинной деформации в полюсе от относительного перемещения полюса для разных значений показателя n кривой упрочнения

Здесь следует учесть то обстоятельство, что в рассматриваемом процессе гидроформовки наиболее интенсивно деформирующимся участком оболочки является окрестность ее полюса (где имеет место наибольшее ее утонение). В этой зоне реализуется состояние однородного двухосного равностороннего растяжения, при котором $\bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_2$ и $\bar{\varepsilon}_h = -(\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2)$. Разрыв формуемой оболочки (происходящий в случае высокопластичных листовых металлов вследствие шейкообразования – локализации деформации) следует ожидать именно в этой зоне. В качестве критического (предельно допустимого – опасного на разрыв) значения $\bar{\varepsilon}_h^*$ толщинной деформации в обсуждаемом состоянии однородного двухосного равностороннего растяжения данного листового металла можно принять значение $\bar{\varepsilon}_h$, непосредственно предшествующее моменту локализации деформации.

Укажем теперь на то, каким образом с использованием диаграмм, представленных на рисунках 4, 5, 6, можно проводить оценки предельно допустимых для рассматриваемого процесса гидроформовки значений параметров q , S , x_0 применительно к заданному металлическому листу (с заданными характеристиками: a , h , A , n).

Полагаем сначала, что известно опасное на разрыв значение $\bar{\varepsilon}_h^*$ толщинной деформации. Тогда с использованием графиков на рисунке 6 определяем соответствующее значение x_0^*/a . Это позволяет с использованием графиков на рисунках 4 и 5 определить искомые значения Q^* (а затем q^*) и S^* .

Если в соответствующем эксперименте непосредственно перед моментом разрыва формуемой оболочки зафиксировано значение x_0^* перемещения ее полюса, то по графикам на рисунках 4, 5, 6 можно сразу определить искомые значения Q^* (а затем q^*), S^* и $\bar{\varepsilon}_h^*$.

Если, наконец, разрыв оболочки в эксперименте фиксируется при давлении q^* на стадии возрастания зависимости $q = q(x_0)$, то, зная значение Q^* , по графикам на рисунке 4 определяем соответствующее значение x_0^*/a . Затем с использованием графиков на рисунках 5, 6 определяем искомые значения S^* и $\bar{\varepsilon}_h^*$.

Выводы

1. С использованием осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели выполнено исследование предельного поведения оболочки, формуемой из закрепленного по контуру круглого металлического листа под действием гидростатического давления. Достоверность получаемых результатов подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными.
2. Построены диаграммы, позволяющие определять предельные параметры процессов гидроформовки круглых листовых заготовок с различными геометрическими и физико-механическими характеристиками.

Литература

1. Сухомлинов Л.Г., Энгельсберг В.К. Конечноэлементная система автоматизированного расчета напряженно-деформированного состояния тонких оболочек в процессах осесимметричного формоизменения под действием жестких штампов // Известия вузов. Машиностроение. 1989. № 3. С. 66-71.
2. Sukhomlinov L.G., Engelsberg V.K., Davydov V.N. A finite element membrane model for the analysis of axisymmetric sheet metal forming processes // Int. J. Mech. Sci. 1992. V. 34. № 3. P. 179-193.
3. Петров В.К., Михайлова В.Л., Сухомлинов Л.Г. Применение осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели для определения коэффициентов трения в процессах формоизменения листовых металлов // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 2. № 2 (14). С. 150-158.
4. Михайлова В.Л., Петров В.К., Сухомлинов Л.Г. Конечноэлементный анализ предельного формоизменения тонкого алюминиевого листа при осесимметричном гидровыпучивании в матрицу с плоским дном // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. № 1. С. 99-110.
5. Михайлова В.Л., Петров В.К., Сухомлинов Л.Г. К оценке точности результатов численного моделирования в проблемах формовки оболочек из листовых металлов // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 2. № 2 (16). С. 154-158.
6. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
7. Woo D.M. The analysis of axisymmetric forming of sheet metal and hydrostatic bulging process // Int. J. Mech. Sci. 1964. V. 6. P. 303-317.
8. Wang N.M., Shammamy M.R. On the plastic bulging of circular diaphragm by hydrostatic pressure // J. Mech. Phys. Solids. 1969. V. 17. P. 43-61.