К оценке точности результатов численного моделирования в проблемах формовки оболочек из листовых металлов

к.т.н. доц. Михайлова В.Л., к.т.н. доц. Петров В.К., д.т.н. проф. Сухомлинов Л.Г.
Университет машиностроения
8(495)223-05-23,доб. 1318

Аннотация. Излагаются результаты применения осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели к исследованию процесса формовки сферическим пуансоном и процесса гидровыпучивания в матрицу с плоским дном. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *осесимметричная жесткопластическая безмоментная конечноэлементная модель, формовка сферическим пуансоном, гидровыпучивание в матрицу*

Компьютерное моделирование с использованием программных конечноэлементных комплексов к настоящему времени прочно вошло в исследовательскую практику специалистов, занимающихся проблемами формоизменения листовых металлов. Точность получаемых при этом числовых результатов по напряженно-деформированному состоянию металлического листа в исследуемом процессе формоизменения существенным образом зависит от таких методических параметров используемой вычислительной модели, как размер ячейки выбранной конечноэлементной сетки и размер шага интегрирования по параметру процесса нагружения. Оценка степени точности результатов численного моделирования обычно осуществляется путем сравнения с экспериментом. Некоторое расхождение расчетных и экспериментальных результатов при этом зачастую объясняют (как отмечено в статье [1]) не погрешностями вычислений, а неполной достоверностью принятого значения коэффициента трения. Уточнение в такой ситуации значения коэффициента трения с целью сблизить расчетные и экспериментальные результаты приводит к тому, что коэффициент трения в определенной степени приобретает черты методического параметра выбранной дискретной модели. Ясно, что для получения реального значения коэффициента трения на основе сравнения расчетных и экспериментальных результатов соответствующее численное решение должно обладать достаточно высокой точностью. В настоящем сообщении моделирование с такой точностью достигается за счет принятия достаточно мелкой сетки и достаточно малого шага интегрирования по параметру нагружения.

Основные положения используемой вычислительной модели состоят в следующем [1]. Исходим из предположения, что формуемая из листового металла под действием давления рабочей жидкости и жестких инструментов осесимметричная оболочка относится к классу тонких безмоментных оболочек. Упругими деформациями на фоне больших пластических деформаций пренебрегаем, считая материал оболочки жесткопластическим. Используем предложенный Р. Хиллом вариант теории течения (квадратичный критерий текучести) для трансверсально изотропного материала с изотропным упрочнением. Считаем, что взаимодействие оболочки с инструментом осуществляется в соответствии с кулоновским законом трения. Меридиан срединной поверхности рассматриваемой оболочки в ее исходном недеформированном состоянии разбиваем на такое количество N участков малых размеров, чтобы в течение всего процесса деформирования допустимо было бы пренебрегать их кривизной, считая эти участки прямолинейными. Процесс формоизменения подобной безмоментной оболочечной модели, состоящей из указанных N элементарных оболочек с прямолинейными образующими, рассматриваем как пошаговый, при котором переход из известного состояния в момент времени t в новое состояние, относящееся к моменту времени $t+\Delta t$, осуществляется с малыми приращениями деформаций. На указанном 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 контактной задачи для дискретной модели оболочки на шаге нагружения сводим посредством итерационной процедуры к решению последовательности линейных задач. При этом линеаризацию исходной нелинейной системы уравнений на шаге нагружения в рамках такой процедуры осуществляем с использованием методов Ньютона и переменных параметров. Итерационные уточнения выполняем до достижения заданной относительной точности ($\delta_{\text{от}}$) по перемещениям. Решение соответствующей системы линейных алгебраических уравнений проводим по методу Гаусса.

Обсудим теперь результаты применения изложенной вычислительной модели к исследованию по определению значения коэффициента трения в операции формовки сферическим пуансоном заготовки из листовой стали 08КП толщиной $h = 0{,}75\ мм$ [2]. Установленные из испытаний на одноосное растяжение коэффициент нормальной анизотропии и кривая упрочнения данного материала имеют вид $R = 1{,}26$ и $\sigma = A\bar{\varepsilon}^n$ (где $A = 541$ МПа, $n = 0{,}22$). Эксперименты по формовке производились с использованием пуансона диаметром $D_{\text{п}} = 60$ мм и матрицы, диаметр отверстия которой составлял величину $D_{\text{м}} = 72$ мм, а радиус скругления рабочей кромки – величину $r_м = 3\,мм$ (рисунок 1). Фланец круглой заготовки из исследуемого материала удерживался от перемещений в процессе формовки прижимным кольцом с рифтом диаметром $D_{\text{р}} = 110$ мм.

В качестве параметра нагружения в вычислительной модели рассматриваемого процесса формовки принималось перемещение U пуансона. На каждом шаге нагружения значение этого параметра увеличивалось на заданную малую величину ΔU.

В процессе тестовых расчетов были выбраны такие значения методических параметров ($N = 220, \Delta U = 0{,}5\,D_П / 3600$ и $\delta_{\text{от}} = 0{,}001$), которые заведомо обеспечивают достаточно высокую точность получаемого численного решения (имеется в виду, что дальнейшее двукратное увеличение параметра N и двукратное уменьшение параметра ΔU не приводит к сколько-нибудь заметному изменению расчетных результатов).

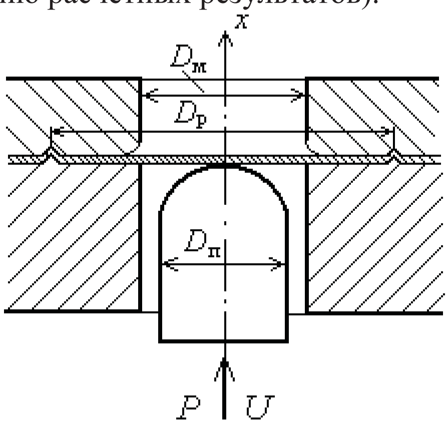

Рисунок 1. Схема формовки сферическим пуансоном

На рисунке 2, 3 дано сопоставление расчетных и (обозначенных точками) экспериментальных результатов по полной картине распределения деформаций (на момент разрыва оболочки) в зоне контакта оболочки с пуансоном применительно к случаям покрытия его поверхности полиэтиленовой пленкой и минеральным маслом. Здесь $\bar{\varepsilon}_s$ и $\bar{\varepsilon}_\varphi$ - логарифмические деформации оболочки в меридиональном и окружном направлениях. Цифрами 1, 2, 3 помечены расчетные результаты, полученные при значениях перемещения U [мм] пуансона вида (27,8; 28,4; 28,8) в случае $\mu = 0{,}14$ (рисунок 2) и вида (20,0; 20,4; 20,8) в случае $\mu = 0{,}3$ (рисунок 3). Из указанных рисунков видно, что результаты, помеченные цифрой 1, соответствуют моменту достижения формуемой оболочкой предельного состояния, поскольку дальнейшее незначительное продвижение пуансона (варианты 2 и 3) приводит к локализации деформации. Об этом можно судить по наблюдаемому катастрофическому росту пиков кривых распределения деформаций $\bar{\varepsilon}_s$ с одновременным прекращением роста деформаций в зоне контакта формуемой оболочки с пуансоном. Практическое совпадение представленных результатов численного моделирования и эксперимента дает основание заключить, что коэффициент трения в данной ситуации оценивается величиной 0,14 в случае полиэтиленовой пленки и величиной 0,3 в случае минерального масла.

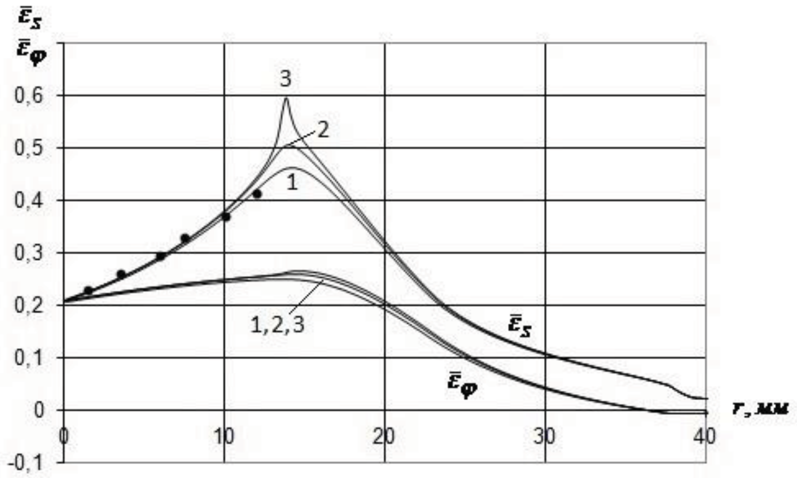

Рисунок 2. Распределение деформаций вдоль радиуса заготовки к моменту разрыва формуемой оболочки в случае нанесения полиэтиленовой пленки на поверхность пуансона

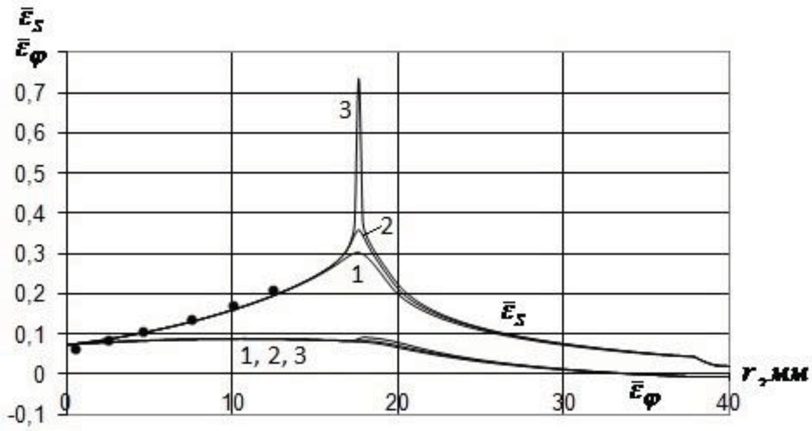

Рисунок 3. Распределение деформаций вдоль радиуса заготовки к моменту разрыва формуемой оболочки в случае нанесения минерального масла на поверхность пуансона

Перейдем теперь к изложению результатов расчетных исследований применительно к процессу гидроформовки. На рисунке 4 изображена схема гидровыпучивания (под действием давления q) круговой заготовки из тонкого алюминиевого листа (толщиной $h = 0{,}31\,мм$) в цилиндрическую матрицу (радиусом $a = 50\,мм$) с плоским дном. Переферийная зона заготовки жестко закреплена. Соответствующие экспериментальные результаты представлены в работе [3]. С учетом малости радиуса скругления рабочей кромки матрицы (составляющего величину порядка $2\,мм$) моделирование осуществляем применительно к случаю круговой заготовки, закрепленной по контуру радиуса $a = 50\,мм$. Рассматриваемый листовой алюминий представляет собой изотропный материал (R = 1) с кривой упрочнения вида $\sigma = A\bar{\varepsilon}^{\,n}$ (где $A = 156{,}4\,МПа$, $n = 0{,}29$). Значение коэффициента трения ($\mu = 0{,}3$) в зоне контакта формуемого листа с пластиной, представляющей собой дно матрицы, было оценено в испытаниях с протягиванием по поверхности указанной пластины образцов из исследуемого листового алюминия, прижимаемых к пластине заданной вертикальной нагрузкой.

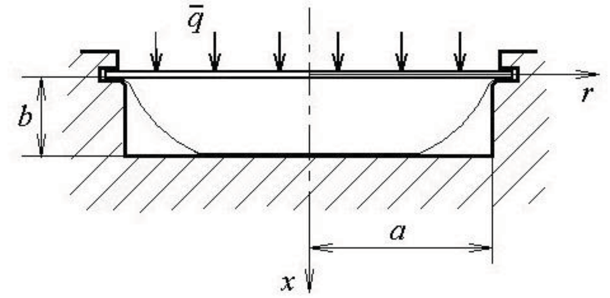

Рисунок 4. Схема гидровыпучивания круговой заготовки из тонкого алюминиевого листа в матрицу с плоским дном

При численном моделировании в качестве параметра нагружения принималось давление q, изменяемое с шагом $\Delta q = 0{,}001\ МПа$. С учетом предыдущего исследования было принято $N = 200$ и $\delta_{\text{от}} = 0{,}001$.

На рисунке 5 представлены относящиеся к случаю $b = 10\,мм$ расчетные (сплошные кривые) и экспериментальные (точки) результаты по распределению меридиональной логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}_S$ вдоль радиуса r рассматриваемой круговой заготовки при q =1,38 $МПа$. Кривые, помеченные цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, соответствуют вариантам расчетов с выбором значений параметров μ, $A\,[МПа]$, n в виде (0,3; 156,4; 0,29), (0,4; 170,0; 0,25), (0,4; 156,4; 0,25), (0,4; 156,4; 0,29), (0,43; 156,4; 0,29), (0,47; 156,4; 0,29), (0,4; 156,4; 0,32). Видно, что задание коэффициента трения в виде $\mu = 0{,}3$ (в соответствии с оценкой, данной в работе [3]) приводит к заметно завышенным по сравнению с экспериментом значениям деформаций исследуемой оболочки в зоне ее контакта с дном матрицы. К более реалистичной картине в этом плане приводят значения μ порядка 0,4. Отмечаем также, что изменение значений параметров A и n кривой упрочнения рассматриваемого листового алюминия в ту или иную сторону относительно значений $A = 156{,}4\,МПа$ и $n = 0{,}29$ (установленных в испытаниях на одноосное растяжение) ведет к заметному отклонению расчетных результатов от эксперимента. Исходя из этого приходим к заключению, что в данном случае $\mu = 0{,}43$, $A = 156{,}4\,МПа$, $n = 0{,}29$.

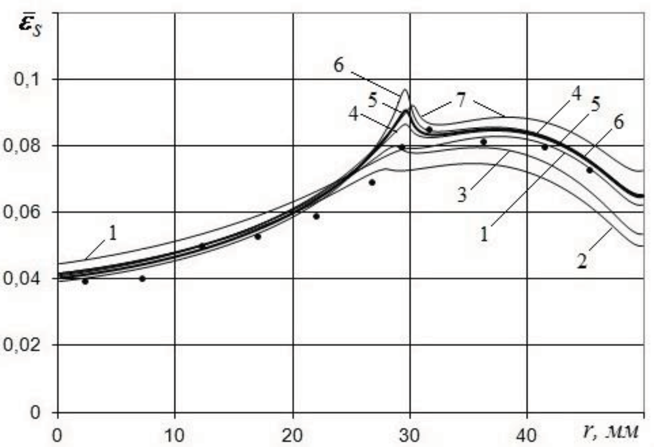

Рисунок 5. Графики распределения меридиональной логарифмической деформации вдоль радиуса рассматриваемой круговой заготовки при различных значениях параметров μ, A, n в случае $b = 10\,мм$ и $q = 1{,}38\,МПа$

В качестве общего вывода отметим, что представленные (и подтвержденные сравнением с экспериментом) результаты расчетных исследований позволили продемонстрировать возможности применения осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели в проблемах формоизменения листовых металлов.

Литература

1. *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. N 3. P. 179-193.
2. Петров В.К., Михайлова В.Л., Сухомлинов Л.Г. Применение осесимметричной жестко-пластической безмоментной конечноэлементной модели для определения коэффициентов трения в процессах формоизменения // Известия МГТУ “МАМИ”. 2012. №2(14), т. 2. С. 150-158.
3. *Nakamachi E., Takezono S., Sowerby R.* A numerical analysis of the hydraulic bulging of circular disks into axisymmetric dies // Trans.ASME. J.Appl.Mech. 1982. V. 49. N 3. P. 501-506.

Предельные возможности операции ротационной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных материалов

д.т.н. проф. Яковлев С.С., д.т.н. проф. Трегубов В.И., Осипова Е.В.
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»
8 (4872) 35-14-82, mpf-tula@rambler.ru

Аннотация. Показано влияние технологических параметров на предельные возможности формоизменения по различным критериям разрушения операции ротационной вытяжки с утонением стенки анизотропного материала.

Ключевые слова: *ротационная вытяжка, анизотропия, деформация, разрушение, повреждаемость, напряжение, ролик подача, степень деформации.*

При изготовлении тонкостенных цилиндрических деталей в настоящее время нашли широкое применение методы обработки давлением с созданием локального очага деформации. Одним из таких методов является ротационная вытяжка (РВ). Теоретическое изучение процесса РВ с утонением осложняется наличием локальной деформации и объемным характером напряженно-деформированного состояния материала в пластической области. Надежность и эффективность технологических процессов ротационной вытяжки обеспечиваются правильным выбором технологических параметров [1-3].

В работе [4] изложена математическая модель формоизменения трубной заготовки при ротационной вытяжке на специализированном оборудовании тонкостенных цилиндрических деталей с утонением стенки коническими роликами с учетом локального очага деформации и фактической подачи $S_ф$ металла в очаг деформации (рисунок 1). В отличие от известных подходов к анализу кинематики течения материала в очаге пластической деформации в работе принято, что процесс реализуется в условиях квазиплоской деформации, т.е. рассматривается течение материала в плоскости, перпендикулярной оси z, и учитываются соответствующие величины касательных напряжений.

Рассмотрен вопрос о распределении скоростей течения материала в очаге деформации при установившемся деформировании. Предложены выражения для оценки радиальной, тангенциальной и осевой составляющих скоростей течения материала в локальном очаге пластической деформации. В дальнейшем вычисляются компоненты скоростей деформаций по известным скоростям течения материала в цилиндрической системе координат.

Используя уравнение равновесия в цилиндрической системе координат и уравнение пластического течения, устанавливающие связи между напряжениями и скоростями деформаций, после подстановки последних в уравнения равновесия получена система уравнений для определения среднего напряжения. Записав уравнения равновесия в виде конечных разностей и разрешив каждое из них относительно среднего напряжения, получим выражения для определения величины среднего напряжения σ.

Известно, что на границе входа материала в очаг пластической деформации величина осевого напряжения равна нулю, т.е. $\sigma_z = 0$. Это условие позволяет определить распределе-