

Предельные параметры формовки круглого стального листа, локально нагружаемого пуансоном комбинированного профиля

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 конечно-элементной модели в исследовании процесса формовки круглого стального листа пуансоном комбинированного профиля, составленного из двух дуг окружностей, радиусы которых существенно меньше радиуса листа. Разрыв формируемой оболочки предсказывается расчетной моделью по моменту локализации деформации.

Ключевые слова: осесимметричная жесткопластическая безмоментная конечно-элементная модель, формовка пуансоном комбинированного профиля, локализация деформации

В статьях [1 – 3] путем сравнения с экспериментом продемонстрирована способность осесимметричной жесткопластической безмоментной конечно-элементной модели [4, 5] надежно предсказывать момент разрыва тонкой оболочки вращения, формируемой из закрепленной по контуру круглой листовой заготовки из высокопластичного металла под действием жесткого инструмента. При этом упомянутый момент разрыва фиксируется в расчетной модели по моменту потери несущей способности формируемой оболочки вследствие локализации деформации (шейкообразования). Это дает основание к использованию указанной расчетной методики при решении такой оптимизационной задачи, как поиск профиля инструмента, способного в реальных условиях трения и при заданных ограничениях обеспечить получение формовкой оболочки с наибольшей (на момент разрыва) площадью поверхности. Ниже, опираясь на результаты исследований, представленных в работе [3], подобная задача решается применительно к случаю формовки оболочки из низкоуглеродистой листовой стали под действием пуансона малых по сравнению с листовой заготовкой размеров.

Основные положения используемой вычислительной модели состоят в следующем. Исходим из предположения, что формируемая из листового металла под действием жесткого инструмента осесимметричная оболочка относится к классу тонких безмоментных оболочек. Задачу о нагружении такой оболочки рассматриваем в статической формулировке. Упругими деформациями на фоне больших пластических деформаций пренебрегаем, считая материал оболочки жесткопластическим. Используем предложенный Р. Хиллом [6] вариант теории течения (квадратичный критерий текучести) для трансверсально изотропного материала с изотропным упрочнением (в случае изотропного материала полагаем $R=1$, где R – коэффициент нормальной анизотропии материала). Считаем, что взаимодействие оболочки с инструментом осуществляется в соответствии с кулоновским законом трения. Меридиан средней поверхности рассматриваемой оболочки в ее исходном недеформированном состоянии разбиваем на такое количество N участков малых размеров Δs , чтобы в течение всего процесса деформирования допустимо было бы пренебрегать их кривизной, считая эти участки прямолинейными. С выбором цилиндрической системы координат (x, r, φ) 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.

Решение сформулированной физически и геометрически нелинейной контактной задачи для дискретной модели оболочки на шаге нагружения (на интервале времени Δt) сводится посредством итерационной процедуры к решению последовательности линейных задач. При этом линеаризация исходной нелинейной системы уравнений на шаге нагружения в

рамках такой процедуры осуществляется с использованием методов Ньютона и переменных параметров. Итерационные уточнения выполняются до достижения заданной относительной точности ($\delta_{от}$) по перемещениям. Решение соответствующей системы линейных алгебраических уравнений проводится по методу Гаусса.

На рисунке 1 представлена схема формовки тонкого металлического листа сферическим пуансоном. Здесь a – радиус пуансона, b – радиус закрепленного контура листовой заготовки, U – перемещение пуансона, P – сила, с которой пуансон давит на формируемую оболочку. Трение, имеющее место в зоне контакта оболочки с пуансоном, сдерживает рост деформаций в элементах оболочки, входящих в эту зону. По мере движения пуансона, сопровождаемого изменением зоны контакта, в оболочке выделяются элементы, где рост деформаций происходит с существенно большей интенсивностью, чем в других ее местах. При некотором критическом значении перемещения пуансона U^* дальнейший рост деформации локализуется в каком-либо одном из указанных элементов в то время, как в остальных элементах оболочки рост деформаций практически прекращается. Несущая способность оболочки при этом достигает своего предела, а сила P достигает своего предельного значения P^* . Оболочка в этот момент претерпевает разрыв.

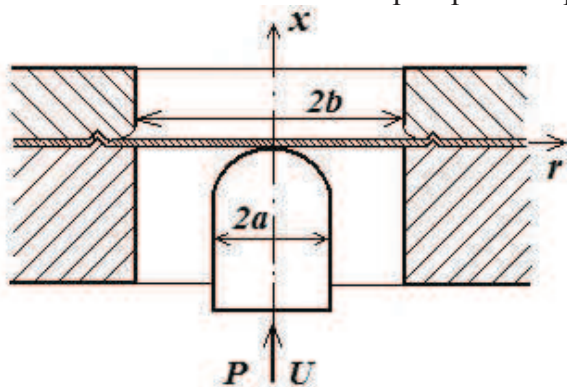


Рисунок 1. Схема формовки сферическим пуансоном

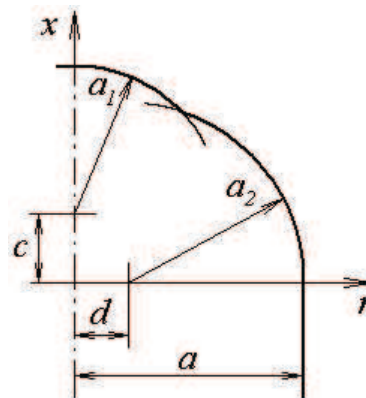


Рисунок 2. Схема пуансона комбинированного профиля

В статье [3] представлены результаты расчетных исследований по определению указанных критических значений для случая формовки стального листа с использованием пуансона, радиус которого a существенно меньше радиуса листа b . Материал листа предполагался изотропным ($R=1$). Диаграмма упрочнения этого материала задавалась зависимостью вида $\sigma = A\bar{\varepsilon}^n$, где $A=550 \text{ МПа}$, $n=0,19$. Толщина листа и его радиус были заданы в виде: $h=1 \text{ мм}$, $b=111,4 \text{ мм}$. Коэффициент трения определен в виде $\mu=0,2$. Рассматривались два варианта формовки: 0) пуансоном с радиусом $a=25 \text{ мм}$; 1) пуансоном с радиусом $a=50 \text{ мм}$. Согласно расчету, критическое значение перемещения пуансона для варианта с номером 0 имеет вид $U^*=42 \text{ мм}$, а с номером 1 – $U^*=60,5 \text{ мм}$. При этом в первом случае катастрофический рост деформаций имеет место в элементе заготовки, отстоящем от ее центра на расстоянии $r=10 \text{ мм}$, во втором случае – в элементе на расстоянии $r=23 \text{ мм}$.

Отмеченные выводы непосредственно следуют из анализа кривых с номерами 0 и 1 на рисунках 3, 4 и 5, соответствующих одноименным расчетным вариантам. Характерные пики в картине распределения меридиональных деформаций $\bar{\varepsilon}_s$ указывают на места шейкообразования (в одном случае при $r=10 \text{ мм}$, в другом - при $r=23 \text{ мм}$). Выполненные таким образом расчетные прогнозы по моментам разрыва оболочек в описанных вариантах процесса формовки хорошо согласуются с экспериментальными данными работы [7].

Основываясь на изложенных выводах, переходим далее к формулировке и решению

соответствующей оптимизационной задачи.

Вводим в рассмотрение параметр $E_S = (S - S_b)/S_b$, представляющий собой относительное увеличение площади поверхности формируемой оболочки. Здесь $S_b = \pi b^2$ – площадь исходной листовой заготовки, S – площадь поверхности формируемой оболочки. Отметим, что для расчетного варианта с номером 1 указанный параметр к моменту разрыва оболочки (потери ее несущей способности вследствие локализации деформации) достигает значения $E_S = 0,149$.

В качестве базового принимаем обсужденный уже вариант формовки с номером 1. Вводим в рассмотрение пуансон комбинированного профиля (рисунок 2), рабочая зона которого составлена из двух дуг окружностей с радиусами a_1 и a_2 , при том условии, что радиус его цилиндрической части сохраняет то же значение $a = 50$ мм, что и в базовом варианте 1. Замечаем при этом, что частным случаем введенного таким образом параметризованного профиля является принятый базовый вариант профиля пуансона, реализуемый при $a_1 = a_2 = 50$ мм и $c = d = 0$.

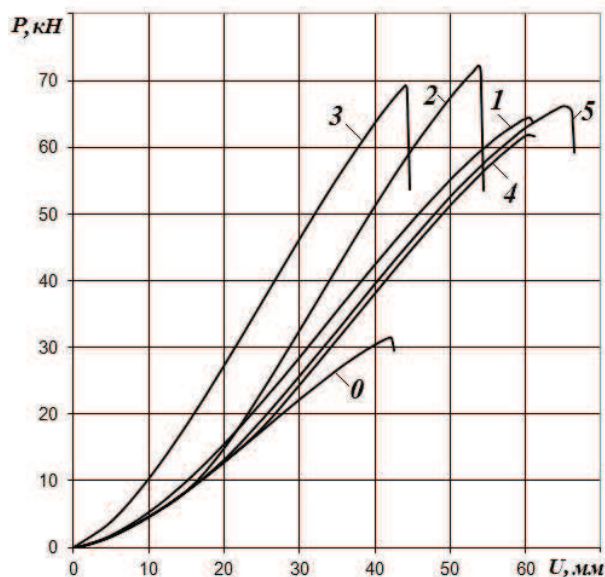


Рисунок 3. Графики зависимости силы давления P на формируемую оболочку от перемещения U пуансона, соответствующие вариантам 0, 1, 2, 3, 4, 5 его профиля

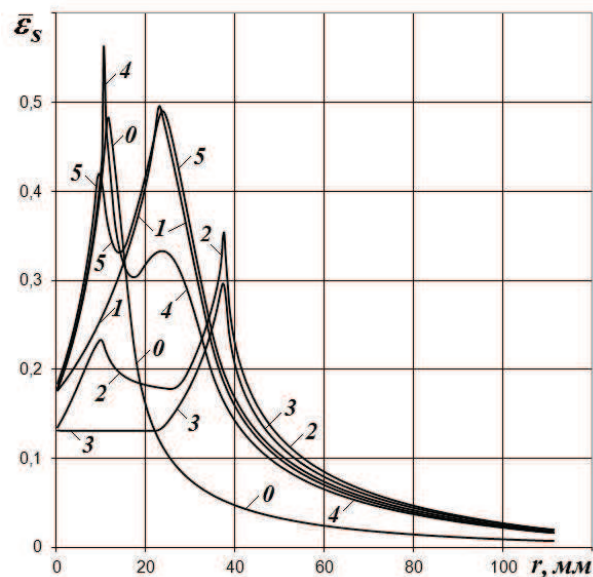


Рисунок 4. Графики распределения меридиональной логарифмической деформации $\bar{\epsilon}_s$ вдоль радиальной оси r исходного листа (в момент потери несущей способности формируемой оболочки), соответствующие вариантам 0, 1, 2, 3, 4, 5 профиля пуансона

Решение задачи по поиску наилучшего варианта формовки рассматриваемого стального листа под действием описанного пуансона комбинированного профиля (в тех же, что и в базовом варианте условиях трения) проводим следующим образом. Осуществляем численное моделирование рассматриваемого процесса формовки, выбрав какой-либо конкретный вариант значений параметров a_1 , a_2 , c , d . Фиксируем указанным выше способом момент потери несущей способности формируемой оболочки (момент ее разрыва) и определяем достигнутое к этому моменту значение параметра E_S . Ищем вариант, при котором найденное значение E_S превышает то, что имеет место для принятого базового варианта формовки.

Отметим, что, как и в работе [3], расчеты проводились с выбором методических параметров дискретной модели в виде: $N = 400$, $\Delta U = 0,02$ мм и $\delta_{от} = 0,001$, где ΔU – приращение перемещения пуансона на шаге нагружения.

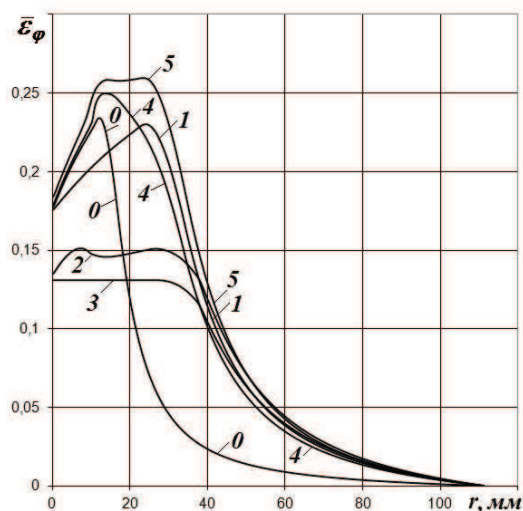


Рисунок 5. Графики распределения окружной логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}_\varphi$ вдоль радиальной оси r исходного листа (в момент потери несущей способности формируемой оболочки), соответствующие вариантам 0, 1, 2, 3, 4, 5 профиля пуансона

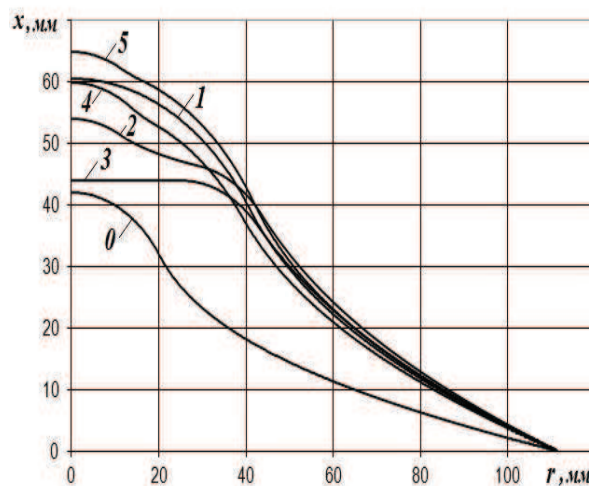


Рисунок 6. Профили отформованных оболочек, соответствующие вариантам 0, 1, 2, 3, 4, 5 профиля пуансона

На обсуждавшихся уже рисунках 3, 4 и 5 представлены результаты расчетов для некоторых из исследованных таким образом вариантов формовки (обозначенных здесь цифрами 2, 3, 4, 5). На рисунке 6 приведены также профили формируемых оболочек (на момент разрыва), соответствующие расчетным вариантам с номерами 0, 1, 2, 3, 4, 5.

В указанных вариантах с номерами 2, 3, 4, 5 параметры (a_1 ; a_2 ; c ; d [мм]) имеют значения (25; 25; 7,32; 25), (25; 25; 0; 25), (25; 50; 28; 0), (25; 50; 27; 0), соответственно. Расчетами установлено, что в отмеченных вариантах формовки параметр E_S (на момент разрыва оболочки) принимает значения {0,133; 0,116; 0,133; 0,164}, соответственно. Как видно, вариант формовки с номером 5 позволяет увеличить значение параметра E_S (на момент разрыва оболочки) на 10% по сравнению с тем, что имеет место в принятом базовом варианте формовки (с номером 1). Все остальные из рассмотренных вариантов формовки в этом отношении существенно теряют по сравнению с базовым вариантом. Это наглядно демонстрирует и рисунок 6, где видно, что высота отформованной оболочки (в момент разрыва) в варианте 5 заметно (почти на 8%) превосходит высоту оболочки в случае базового варианта формовки. Остальные варианты по этому параметру заметно уступают базовому варианту. Отметим, что обсуждаемые высоты отформованных оболочек соответствуют критическому перемещению U^* пуансона в каждом из соответствующих расчетных вариантов. При этом указанные значения U^* оцениваются на основе графиков, представленных на рисунке 3, по достижению соответствующими силовыми характеристиками своих предельных значений (P^*).

Анализ графиков распределения деформаций, представленных на рисунках 4 и 5, позволяет понять причину отмеченного положительного эффекта, достигаемого при переходе к варианту формовки с номером 5. Как видно, в случае варианта с номером 0 деформация листового заготовке происходит в значительной мере за счет деформирования элементов, близких к ее центру (при $r < 17$ мм). В случае базового варианта (с номером 1) зона наибольшего деформирования несколько удаляется от центра заготовки (и имеет место при 17 мм $< r < 30$ мм). Варианты формовки с номерами 2 и 3 оказываются не эффективными

вследствие того, что при их осуществлении не удастся добиться высокого (как в вариантах 0 и 1) уровня растяжения центральной зоны листовой заготовки (при $r < 30 \text{ мм}$). Вариант формовки с номером 4, хотя и обеспечивает тот же высокий уровень растяжения близких к центру элементов заготовки (при $r < 17 \text{ мм}$), что и в случае варианта 0, но проигрывает базовому варианту (с номером 1), поскольку не способен обеспечить необходимый уровень растяжения элементов, расположенных в диапазоне ($17 \text{ мм} < r < 30 \text{ мм}$). Вариант с номером 5 в этом плане оказывается выигрышным (по сравнению с базовым вариантом), поскольку он позволяет не только обеспечить в зоне $17 \text{ мм} < r < 30 \text{ мм}$ уровень деформаций не ниже того, что имеет место в базовом варианте, но и одновременно реализовать преимущества варианта с номером 0 по уровню растяжения элементов в зоне $r < 17 \text{ мм}$.

Завершая данную статью, отметим основные выводы.

1. С применением осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели выполнено исследование предельных параметров формоизменения оболочки, формируемой из закрепленного по контуру круглого стального листа, локально нагружаемого пуансоном комбинированного профиля, составленного из двух дуг окружностей, радиусы которых существенно меньше радиуса листа.
2. Расчетным путем установлен такой вариант профиля пуансона, который позволяет рассматриваемого типа формовкой получить оболочку, относительное увеличение площади поверхности которой (на момент разрыва) заметно (в данном случае на 10%) превышает то, что имеет место в случае аналогичной формовки сферическим пуансоном.

Литература

1. 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. № 2(14), т. 2. С. 150 – 158.
2. 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. № 2(16), т. 2. С. 154 – 158.
3. Михайлова В.Л., Сухомлинов Л.Г. Предельное формоизменение закрепленного по контуру круглого стального листа под действием сферического пуансона, радиус которого существенно меньше радиуса исходного листа // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. №1(19), т. 4. С. 105 – 110.
4. 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.
5. 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.
6. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
7. Simonsen B.C., Lauridsen L.P. Energy absorption and ductile failure in metal sheets under lateral indentation by a sphere // Int. J. Impact Engng. 2000. V.24. P. 1017 – 1039.