

## **Предельное формоизменение закрепленного по контуру круглого стального листа в двухоперационном процессе формовки с использованием сферических пуансонов малого радиуса**

к.т.н. доц. Михайлова В.Л., 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 предельных параметров формоизменения закрепленного по контуру круглого стального листа в двухоперационном процессе формовки с использованием сферических пуансонов малого радиуса. Разрыв формуемой оболочки предсказывается расчетной моделью по моменту локализации деформации.

*Ключевые слова:* осесимметричная жесткопластическая безмоментная конечноэлементная модель, двухоперационная формовка сферическими пуансонами, локализация деформации

Процессы формовки закрепленных по контуру круглых заготовок из листовых металлов под действием жестких инструментов широко используют в практике для получения оболочек вращения различной конфигурации. В подобных процессах площадь поверхности формуемой оболочки существенно увеличивается по сравнению с тем, что имеет место в исходном плоском состоянии. Ограничивающим при этом фактором является разрыв формуемой оболочки, который в случае высокопластичных листовых металлов (таких, как низкоуглеродистые листовые стали) обычно происходит вследствие локализации деформации (шейкообразования). В качестве одного из способов решения задачи получения в указанном процессе оболочки с максимально возможным значением площади поверхности может рассматриваться вариант выполнения этого процесса в две операции. В настоящей статье такой двухоперационный процесс (с использованием сферических пуансонов малого по сравнению с заготовкой радиуса) исследуется расчетным путем с применением осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели [1, 2].

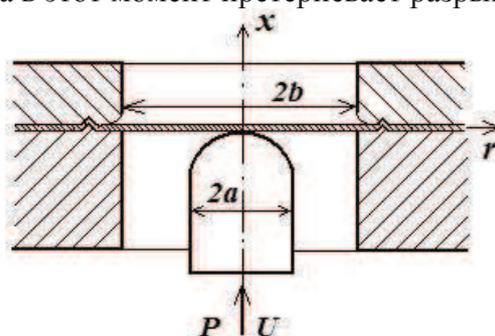
Основные положения указанной вычислительной модели состоят в следующем. Исходим из предположения, что формуемая из листового металла под действием жесткого инструмента осесимметричная оболочка относится к классу тонких безмоментных оболочек. Задачу о нагружении такой оболочки рассматриваем в статической формулировке. Упругими деформациями на фоне больших пластических деформаций пренебрегаем, считая материал оболочки жесткопластическим. Используем предложенный Р. Хиллом [3] 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, чтобы в течение всего процесса деформирования допустимо было бы пренебрегать их кривизной, считая эти участки прямолинейными. С выбором цилиндрической системы координат  $(x, r, \varphi)$  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 зада-

чи для дискретной модели оболочки на шаге нагружения (на интервале времени  $\Delta t$ ) 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. Завершая описание вычислительной модели, укажем на публикации [1, 2, 4 – 8], где представлены примеры, подтверждающие надежность получаемых с помощью нее результатов.

На рисунке 1 представлена схема формовки тонкого металлического листа сферическим пуансоном в одну операцию. Здесь:  $a$  – радиус пуансона,  $b$  – радиус закрепленного контура листовой заготовки,  $U$  – перемещение пуансона,  $P$  – сила, с которой пуансон давит на формуемую оболочку.

Отмечаем важную роль трения в зоне контакта оболочки с пуансоном [4]. Трение сдерживает развитие деформаций формуемой оболочки в этой зоне, в результате чего преимущественный рост деформаций реализуется в элементах оболочки, несколько удаленных от ее полюса. При некотором критическом значении перемещения пуансона  $U^*$  дальнейший рост деформации локализуется в одном из указанных элементов оболочки 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**

В статье [8] представлены результаты расчетных исследований по определению указанных критических значений для случая однооперационной 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  $\sigma = A\bar{\epsilon}^n$ , 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: 1) пуансоном с радиусом  $a = 25 \text{ мм}$ ; 2) пуансоном с радиусом  $a = 50 \text{ мм}$ .

Согласно расчету критическое значение перемещения пуансона в первом случае имеет вид  $U^* = 42 \text{ мм}$ , во втором –  $U^* = 60,5 \text{ мм}$ . При этом катастрофический рост деформаций в первом случае зафиксирован в элементе заготовки, отстоящем от ее центра на расстоянии  $r = 10 \text{ мм}$ , во втором случае – в элементе на расстоянии  $r = 23 \text{ мм}$ . Достоверность полученных расчетных результатов подтверждена сравнением с экспериментальными данными, представленными в работе [9].

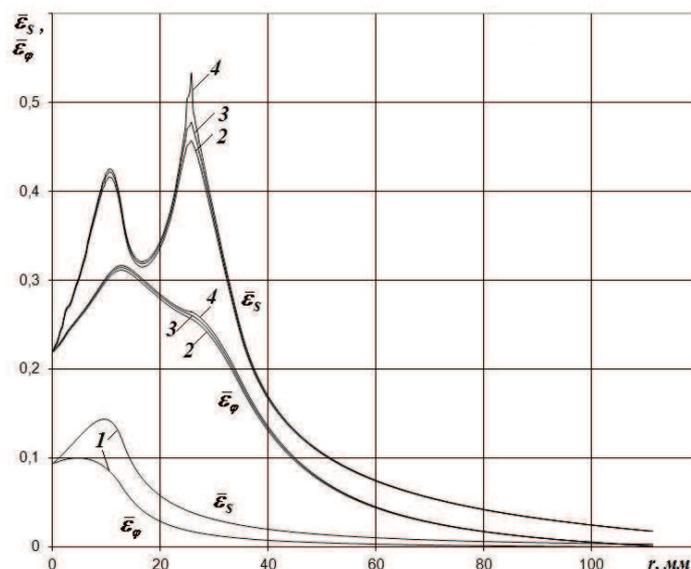
Учитывая сказанное, будем рассматривать далее задачу об отыскании (в рамках тех же исходных данных) такого варианта формовки описанной листовой заготовки (но уже в две операции с использованием тех же пуансонов), который позволил бы получить оболочку

(чашу) высотой, превышающей указанное значение  $60,5 \text{ мм}$ , не доводя оболочку до разрыва. Решение этой задачи с применением описанной вычислительной модели проводим следующим образом.

В качестве первой операции предполагаемого двухоперационного процесса формовки рассматриваем формовку исходной листовой заготовки под действием пуансона радиусом  $a = 25 \text{ мм}$ . При численном моделировании в качестве параметра нагружения принимаем перемещение  $U$  пуансона, считая, что в начальный для каждой из рассматриваемых операций формовки момент времени пуансон приведен в контакт с заготовкой (или оболочкой), на которую в последующие моменты времени он начнет действовать. Такое перемещение применительно к первой и второй операции формовки будем обозначать как  $U_{(1)}$  и  $U_{(2)}$ , соответственно.

Численное моделирование формоизменения оболочки в рамках указанной первой операции формовки осуществляем, доводя перемещение пуансона до некоторого значения  $U_{(1)}$ , меньшего предельно допустимого для этой операции значения  $U^* = 42 \text{ мм}$ . Приняв полученную таким образом оболочку в качестве заготовки, а в качестве инструмента пуансон с радиусом  $a = 50 \text{ мм}$ , осуществляем численное моделирование формоизменения исследуемой оболочки в рамках второй операции формовки. Расчет проводим до такого значения перемещения  $U_{(2)}^*$  пуансона, при котором фиксируется потеря несущей способности формируемой оболочки вследствие локализации деформации. Варьируя значение перемещения пуансона  $U_{(1)}$  в первой операции, ищем решение сформулированной задачи по оптимизации исследуемого процесса формовки.

Проведенными параметрическими исследованиями установлено, что отмеченному оптимальному варианту рассматриваемого процесса формовки соответствует выбор значения перемещения пуансона в первой операции в виде  $U_{(1)} = 25 \text{ мм}$ . Соответствующие результаты расчетов для этого случая представлены на рисунках 2, 3 и 4. Отметим, что, как и в работе [8], расчеты проводились с выбором методических параметров дискретной модели в виде:  $N = 400$ ,  $\Delta U = 0,02 \text{ мм}$  и  $\delta_{от} = 0,001$ , где  $\Delta U$  – приращение перемещения пуансона на шаге нагружения.

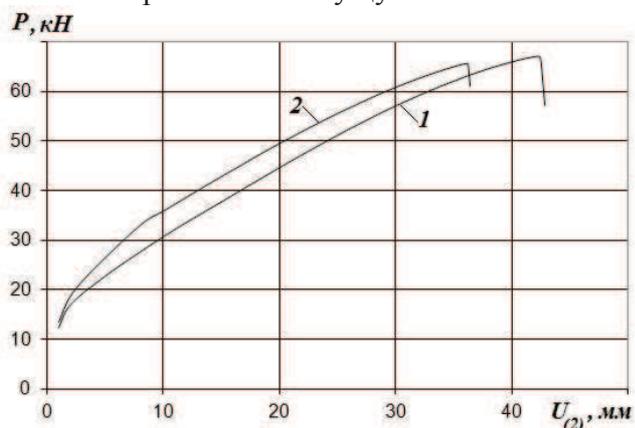


**Рисунок 2. Распределение деформаций вдоль оси  $r$  исходного листа на различных этапах формовки (случай  $U_{(1)} = 25 \text{ мм}$ )**

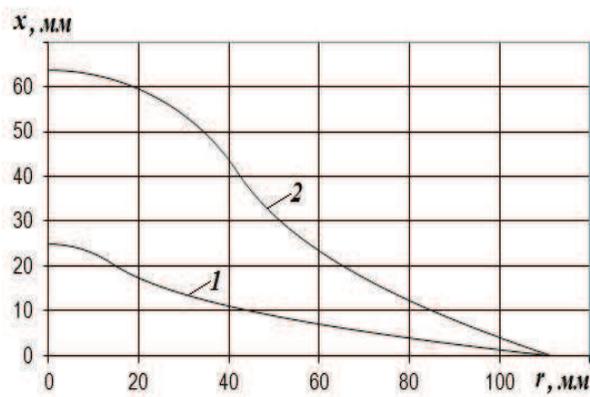
На рисунке 2 приведены графики распределения деформаций формируемой оболочки

вдоль радиальной оси  $r$  исходного листа на различных этапах формовки. Здесь  $\bar{\varepsilon}_s$  и  $\bar{\varepsilon}_\phi$  – логарифмические деформации оболочки в меридиональном и окружном направлениях. Цифрой 1 помечены результаты, относящиеся к первой операции формовки (при  $U_{(1)} = 25$  мм). Цифрами 2, 3, 4 помечены результаты, относящиеся ко второй операции формовки и соответствующие следующим значениям перемещения  $U_{(2)}$  пуансона: 41,5 мм, 42 мм, 42,5 мм.

Как видно, в рассматриваемом случае при перемещении  $U_{(2)}$  пуансона порядка 41,5 мм в картине распределения деформаций  $\bar{\varepsilon}_s$  имеют место два характерных всплеска примерно одинакового уровня. Они указывают на два опасных с точки зрения разрыва участка формуемой оболочки. Замечаем, что пиковые значения указанных деформаций имеют место в элементах заготовки, отстоящих от ее центра на расстояниях  $r = 10$  мм и  $r = 23$  мм. Это уже упоминавшиеся выше места разрыва оболочки в случаях однооперационной формовки с использованием пуансонов с радиусами  $a = 25$  мм и  $a = 50$  мм, соответственно. В рассматриваемом же случае двухоперационной формовки можно видеть, что при  $U_{(2)} > 42$  мм рост деформаций прекращается всюду, кроме элемента с  $r = 23$  мм, где такой рост принимает катастрофический характер. На то, что перемещение пуансона  $U_{(2)}^* = 42$  мм является для рассматриваемого случая критическим, указывает также и поведение кривой 1 на рисунке 3, которая представляет собой силовую характеристику второй операции обсуждаемого процесса формовки. Как видно, при  $U_{(2)}^* = 42$  мм сила давления  $P$  на оболочку со стороны пуансона в указанной операции достигает своего предельного значения, и с этого момента формуемая оболочка теряет свою несущую способность.



**Рисунок 3.** Зависимость силы давления  $P$  на формуемую оболочку от перемещения  $U_{(2)}$  пуансона во второй операции формовки в случае  $U_{(1)} = 25$  мм и  $U_{(1)} = 30$  мм

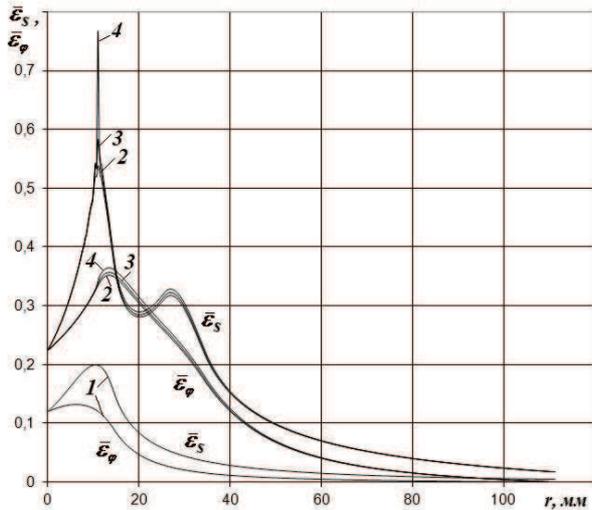


**Рисунок 4.** Профили отформованных в рамках первой и второй операции оболочек (случай  $U_{(1)} = 25$  мм)

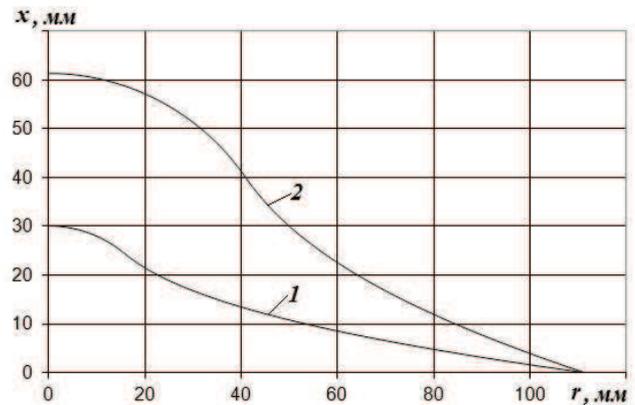
Что касается среднего уровня деформаций, достигнутого в рассматриваемом двухоперационном процессе формовки при  $U_{(2)}^* = 42$  мм, то он заметно выше того, что имеет место в случае однооперационной формовки пуансоном с радиусом  $a = 50$  мм при его перемещении  $U^* = 60,5$  мм (см. [8]). Это указывает на то, что в данном случае высота окончательно отформованной оболочки и ее площадь поверхности должны превышать соответствующие результаты упомянутого однооперационного процесса. В подтверждение этого обратимся к рисунку 4, где представлены профили оболочек, отформованных в рассматриваемом двухоперационном процессе в рамках первой и второй операции. Как видно, высота окончательно отформованной оболочки здесь составляет величину 63,6 мм, что на 5% превышает соответ-

ствующую величину для случая однооперационного процесса. При этом аналогичное превышение по площади поверхности отформованной оболочки оценивается величиной порядка 11%.

Обратим внимание на то, что указанного эффекта по увеличению площади поверхности отформованной оболочки удалось добиться за счет предварительного растяжения центральной зоны оболочки в рамках первой операции формовки, при которой перемещение пуансона составило величину  $U_{(1)} = 25 \text{ мм}$ . Как показали расчеты, в случае превышения параметром  $U_{(1)}$  отмеченного значения 25 мм упомянутый эффект становится менее заметным. В качестве примера на рисунках 5, 6 приведены соответствующие результаты, относящиеся к случаю, когда перемещение пуансона в первой операции формовки составило величину  $U_{(1)} = 30 \text{ мм}$ .



**Рисунок 5. Распределение деформаций вдоль радиальной оси  $r$  исходного листа на различных этапах формовки (случай  $U_{(1)} = 30 \text{ мм}$ )**



**Рисунок 6. Профили отформованных в рамках первой и второй операции оболочек ( $U_{(1)} = 30 \text{ мм}$ )**

Цифрой 1 на рисунке 5 помечены результаты, относящиеся к первой операции формовки (при  $U_{(1)} = 30 \text{ мм}$ ). Цифрами 2, 3, 4 помечены результаты, относящиеся ко второй операции формовки и соответствующие следующим значениям перемещения  $U_{(2)}$  пуансона: 35,5 мм, 36 мм, 36,5 мм. Как видно, в отличие от предыдущего случая (см. рисунок 2) в рассматриваемом случае преимущественный рост деформаций на завершающей стадии формовки имеет место в окрестности элемента оболочки с  $r = 10$  мм. При  $U_{(2)} > 36 \text{ мм}$  этот рост локализуется исключительно в указанном элементе и приобретает катастрофический характер, что в свою очередь проявляется в потере несущей способности формируемой оболочки при  $U_{(2)}^* = 36 \text{ мм}$  (см. кривую 2 на рисунке 3).

Как видно из рисунка 6, окончательно отформованная в рассматриваемом случае оболочка (при  $U_{(2)}^* = 36 \text{ мм}$ ) имеет высоту 61,4 мм, что всего лишь на 1,5% превышает соответствующую величину для случая однооперационного процесса. При этом аналогичное превышение по площади поверхности отформованной оболочки оценивается величиной порядка 2,7%.

Завершая данную статью, отметим ее основные выводы.

1. С применением осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели выполнено исследование предельных параметров формоизменения оболочки, формируемой из закрепленного по контуру круглого стального листа в двухоперационном

процессе формовки с использованием сферических пуансонов малого радиуса.

2. Расчетным путем установлен такой вариант проведения указанного двухоперационного процесса, который позволяет получить оболочку, площадь поверхности которой заметно (в данном случае на 11%) превышает соответствующую величину для случая однооперационного процесса формовки.

### 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. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
4. Петров В.К., Михайлова В.Л., Сухомлинов Л.Г. Применение осесимметричной жестко-пластической безмоментной конечноэлементной модели для определения коэффициентов трения в процессах формоизменения листовых металлов // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. №2(14), т.2. С. 150-158.
5. 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. Вып. 1. С. 99-110.
6. 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.
7. Сухомлинов Л.Г., Михайлова В.Л. Инкрементальная геометрически нелинейная осесимметричная конечноэлементная модель формоизменения толстых оболочек из листовых металлов под действием жестких инструментов // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. №1(15), т. 3. С. 125-130.
8. Михайлова В.Л., Сухомлинов Л.Г. Предельное формоизменение закрепленного по контуру кругового стального листа под действием сферического пуансона, радиус которого существенно меньше радиуса исходного листа // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. №1(19), т. 4. С. 105-110.
9. 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.