

Изменение размеров заготовки на начальном этапе гидромеханической вытяжки

77-48211/475895

08, август 2012

Попков В. М., Космынина Е. В., Логутенкова Е. В.

УДК 621.91

Россия, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

m1@bmstu-kaluga.ru

Деформирование элементов очага деформации на начальном этапе гидромеханической вытяжки характеризуется изменением в первую очередь толщины заготовки, а также изменением кривизны срединной поверхности. Процесс деформирования носит нестационарный характер, так как отношения между силами и моментами переменны как во времени, так и в пространстве. Рост давления жидкости в полости матрицы вносит дополнительные изменения в картину деформированного состояния заготовки.

Определение напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации с математической точки зрения рассматривается как решение краевой задачи с движущимися границами и изменяющимися граничными условиями [1]. Решение подобных задач осуществляется на основе теории пластического течения численными методами с использованием вычислительной техники [1, 2]. Ввиду того, что использование численных методов в процессе анализа напряженно-деформированного состояния заготовки на начальном этапе гидромеханической вытяжки предусматривает определение изменяющихся размеров заготовки, в данной статье приведены зависимости, позволяющие определять эти размеры.

Рассмотрим начальный этап деформирования, когда заготовка только начинает втягиваться в матрицу (рис. 1). Пластическая деформация заготовки начинается после касания торца пуансона поверхностью заготовки. По мере перемещения пуансона можно выделить три части заготовки, характер напряженно-деформированного состояния которых будет различным:

1. круговая часть заготовки, находящаяся в контакте с пуансоном;
2. кольцевая часть заготовки, не контактирующая с пуансоном и прижимом;
3. кольцевая часть заготовки, контактирующая с прижимом.

Перемещение пуансона сопровождается изгибом заготовки по радиусу и ростом растягивающих напряжений на границе двух первых из перечисленных частей заготовки. Возрастание растягивающего напряжения в зоне контакта заготовки с пуансоном затруднено вследствие действия активных сил трения на контактной поверхности, а также вследствие изгиба заготовки на кромке пуансона, препятствующего течению металла из-под торца пуансона [3]. Отсюда следует, что наибольшая величина растягивающего напряжения σ_p будет действовать в сечении, разграничивающем часть заготовки, находящуюся в контакте с пуансоном, с частью, расположенной вне пуансона.

Участок между сечениями AA' и BB' (рис. 1) представляет собой оболочку двойной кривизны переменной толщины. Радиус кривизны срединной поверхности этого участка в меридиональном сечении равен:

$$R_{p_1} = r_{\pi} + \frac{S}{2}. \quad (1)$$

- r_{π} - радиус скругления кромки пуансона;
- S - толщина заготовки в рассматриваемом сечении.

Радиус ρ , координирующий расположение опасного сечения BB' равен:

$$\rho = r_c + \left(r_{\pi} + \frac{S}{2} \right) \cdot \sin \theta. \quad (2)$$

- r_c – расстояние от оси симметрии оболочки (оси пуансона) до оси радиуса скругления кромки пуансона r_{π} ;
- θ – угол между нормалью к срединной поверхности в меридиональном сечении и осью симметрии ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$).

Радиус кривизны срединной поверхности в широтном сечении на рассматриваемом участке определяется по формуле:

$$R_{\theta} = \frac{\rho}{\sin \theta}. \quad (3)$$

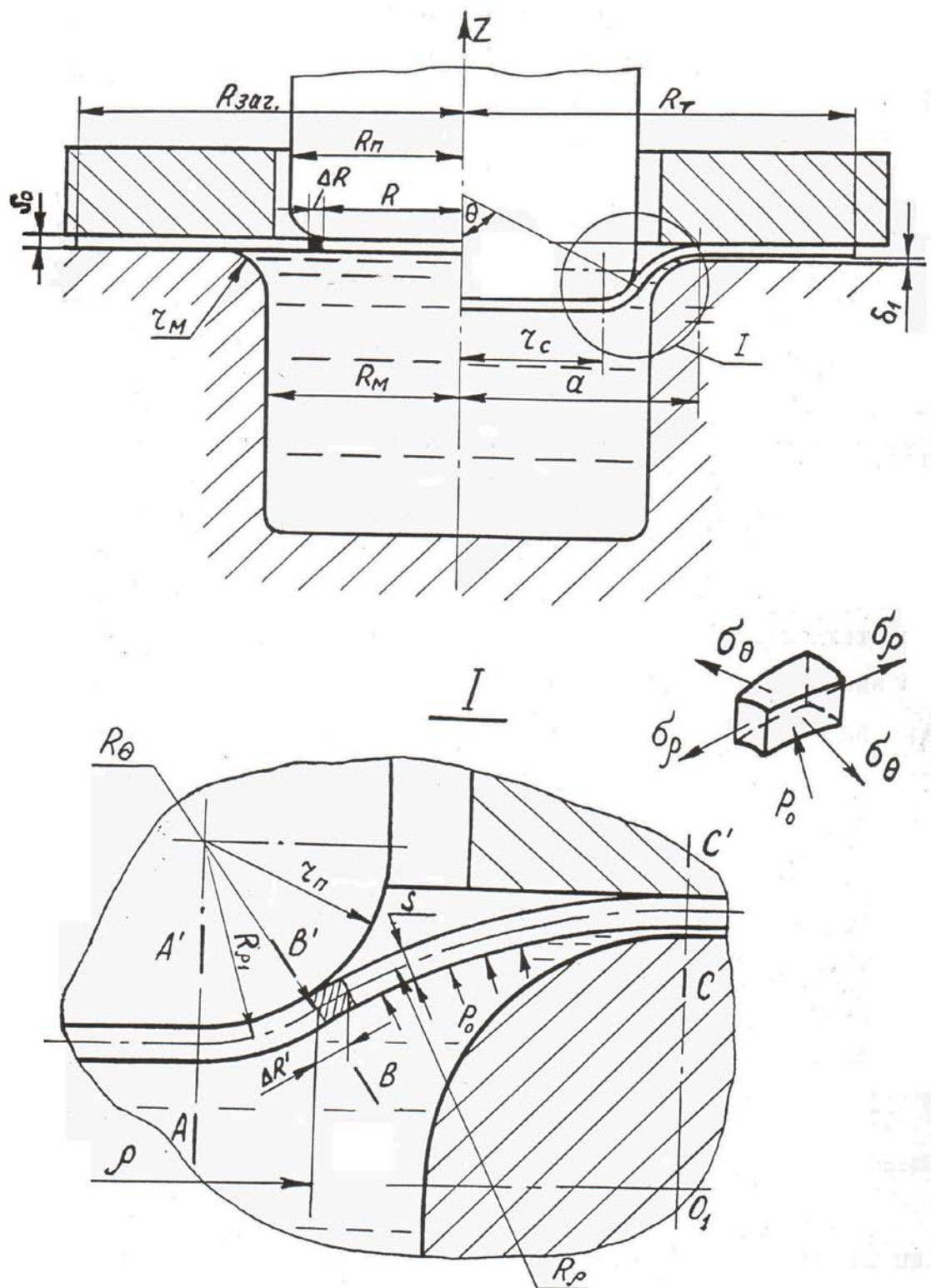


Рис. 1. Схема начального этапа процесса гидромеханической вытяжки
цилиндрических деталей

Участок между сечениями ВВ` и СС` также представляет собой оболочку двойной кривизны переменной толщины. Радиус кривизны срединной поверхности этого участка в меридиональном сечении не известен, поскольку не известна форма поверхности участка.

На начальном этапе гидромеханической вытяжки величина радиуса R_p изменяется по мере перемещения пуансона относительно матрицы. Это изменение связано с изменением напряженного состояния элементов заготовки на участке между сечениями ВВ` и СС`. Значение радиуса R_p через уравнение Лапласа связано с напряжениями, действующими в элементах рассматриваемой части оболочки, с величиной давления жидкости в полости матрицы, с толщиной оболочки и радиусом кривизны элементов в широтном сечении.

Для бесконечно малого элемента оболочки на участке между сечениями ВВ` и СС`, непосредственно примыкающего к сечению ВВ` (рис. 1) уравнение Лапласа имеет вид:

$$\frac{p_0}{S} = \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} - \frac{\sigma_p}{R_p}, \quad (4)$$

где p_0 - давление со стороны жидкости, находящейся в полости матрицы, на заготовку;

σ_θ и σ_p - главное окружное и радиальное напряжение;

R_p - радиус кривизны срединной поверхности рассматриваемого участка в меридиональном сечении ($R_p < 0$, так как центр кривизны поверхности находится с наружной стоны оболочки).

Учитывая сложность точного аналитического определения значения радиуса R_p , а следовательно и сложность определения формы заготовки на участке между сечениями ВВ` и СС`, в предлагаемой статье данный участок заготовки аппроксимировался частью торообразной оболочки. Радиус кривизны срединной поверхности в меридиональном сечении R_p для такой оболочки является радиусом окружности, меняющим свою величину в зависимости от условий деформирования. На рис. 2 представлены возможные варианты изменения геометрических размеров заготовки между сечениями ВВ` СС`, а следовательно и радиуса R_p .

В случае вытяжки относительно тонких заготовок и высоком давлении жидкости в полости матрицы величина радиуса R_p будет достаточно мала, вплоть до соизмеримой с толщиной заготовки, т.е. $R_p = (3 \dots 5) \cdot S$. Теоретическое подтверждение этого положения можно получить, рассмотрев уравнение Лапласа (4). Так как в приведенном уравнении $\sigma_\theta < \sigma_p$ и $R_\theta \gg R_p$, то для случая, представленного на рисунке 2.а. первым членом правой части уравнения можно пренебречь. Тогда из уравнения (4) следует, что

$$R_p = -\frac{S \cdot \sigma_\theta}{p_0}. \quad (5)$$

Таким образом, величина радиуса R_p возрастает с ростом толщины заготовки и уменьшается с ростом давления в полости матрицы. Теперь, если принять в уравнении (5) значение радиуса $R_p = 4S$, то давление жидкости p_o составит величину $0,25\sigma_p$. Учитывая, что на начальном этапе вытяжки растягивающие напряжения в опасном сечении ВВ` интенсивно растут, достигая напряжения текучести, можно предположить и значительную величину давления жидкости в полости матрицы. Однако, на начальном этапе гидромеханической вытяжки большие значения давления жидкости p_o маловероятны, к тому же значительный рост растягивающих напряжений способствует увеличению радиуса R_p , поэтому схема, представленная на рисунке 2а, в реальных условиях нужна лишь при вытяжке относительно тонких заготовок или в случае запираения жидкости в матрице, когда давление прижима, значительно влияющее в начальный момент вытяжки на величину p_o будет чрезмерно превышать рекомендуемые значения.

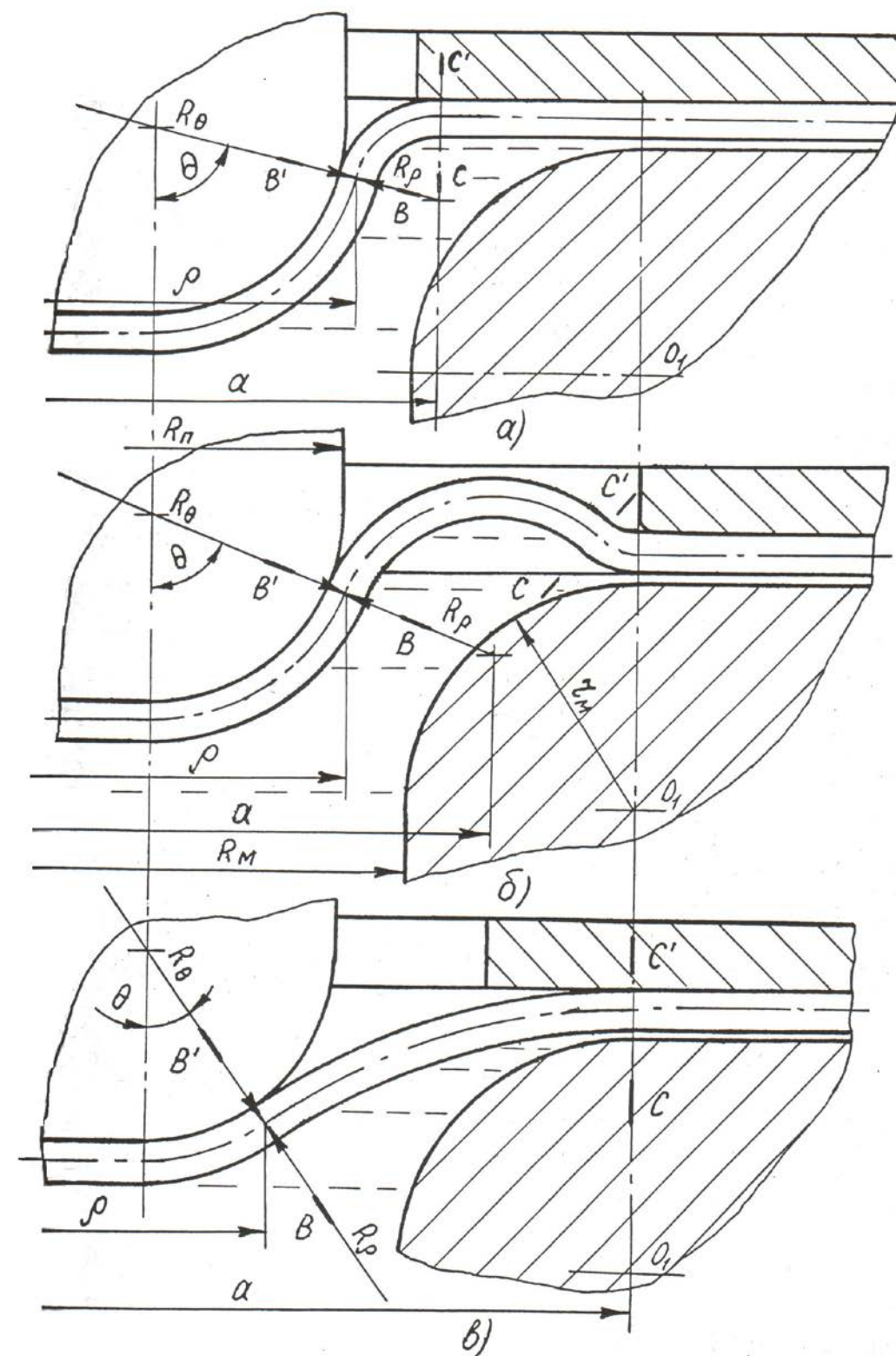


Рис. 2. Возможные варианты изменения геометрии и размеров заготовки в очаге пластических деформаций на начальном этапе гидромеханической вытяжки

Кроме того, с технологической точки зрения, образование участка с малым радиусом кривизны способствует интенсивному росту растягивающих напряжений в опасном сечении, вызванному изгибом заготовки, а значит и росту усилия вытяжки. В связи с этим можно предположить, что при такой геометрии участка ВВ' - СС' уже начальная стадия гидромеханической вытяжки будет сопровождаться обрывом заготовок в опасном сечении ВВ', то есть с точки зрения процесса вытяжки такая геометрия нежелательна.

В отличие от схемы начального этапа вытяжки, показанной на рисунке 2а, где зазор между пуансоном и прижимом соизмерим с толщиной заготовки, на рисунке 2б представлена схема с достаточно большим зазором, равным разности между размерами $R_{\text{н}} + r_{\text{н}}$ и $R_{\text{п}}$. Наличие зазора такой величины, объясняется тем, что усилие прижима перед вытяжкой воспринимается заготовкой только на кольцевом участке, внутренний диаметр которого равен $2 \cdot (R_{\text{н}} + r_{\text{н}})$, а наружный – диаметру заготовки. Поэтому использовать прижим с диаметром отверстия меньше чем $2 \cdot (R_{\text{н}} + r_{\text{н}})$ нет необходимости. Образованию представленной на рисунке 2б формы заготовки на участке между сечениями ВВ' и СС' способствует, как и в первом случае (рис. 2а), высокое давление жидкости в полости матрицы и малая относительная толщина заготовки. Однако, в данном случае величина радиуса кривизны $R_{\text{р}}$ несколько больше, чем в первом случае, а значит несколько лучше условия вытяжки. Учитывая определенную стесненность торообразного участка заготовки между сечениями ВВ' и СС', величину радиуса $R_{\text{р}}$ можно приближенно определить исходя из геометрических соображений. Так как центр кривизны рассматриваемого участка, удаленный от оси симметрии на расстояние α , будет лежать на пересечении нормалей, проходящих через сечения ВВ' и СС', т.е. постоянно находиться в пределах между $(R_{\text{н}} + r_{\text{н}})$ и $R_{\text{п}}$, можно записать, что приближенно

$$\alpha \approx \frac{R_{\text{н}} + r_{\text{н}} + R_{\text{п}}}{2}. \quad (6)$$

Тогда радиус кривизны в меридиональном сечении будет равен

$$R_{\text{р}} = \frac{\alpha - \rho}{\sin \theta} = \frac{(R_{\text{н}} + r_{\text{н}} + R_{\text{п}}) - 2\rho}{2 \cdot \sin \theta}, \quad (7)$$

где $R_{\text{н}} \approx R_{\text{п}} + S$.

Анализируя полученную зависимость (7), можно заметить, что она достаточно верно описывает изменение радиуса $R_{\text{р}}$ по мере изменения величин ρ и θ . Так, например, при малых углах контакта заготовки со скругленной частью пуансона, что имеет место в самом начале процесса вытяжки, величина $R_{\text{р}}$ будет большой из-за малости значения $\sin \theta$, а при $\theta = 90^\circ$ и

$\rho = R_{\pi} + \frac{S}{2}$ величина радиуса кривизны будет равна $R_p = r_{\pi} + \frac{S}{2}$, что соответствует действительности, так как в конце начального этапа вытяжки с исчезновением выпуклой торообразной складки величина R_p должна быть равна радиусу скругления кромки матрицы r_{π} , увеличенному на половину толщины заготовки и толщину слоя смазки порядка $(0,1...0,2)S$. Наличие торообразной складки, представленной на рисунке 2б на протяжении всего процесса однопереходной гидромеханической вытяжки нежелательно из-за роста растягивающих напряжений, вызванных дополнительным изгибом заготовки по радиусу $R_p < r_{\pi} + \frac{S}{2}$ и радиусу скругления кромки прижима вблизи сечения CC' , что приведет к росту растягивающего напряжения и усилия вытяжки, повысит вероятность обрыва деталей.

Наиболее благоприятным с точки зрения условий деформирования, является изменение формы заготовки на участке между сечениями BB' и CC' , представленное на рисунке 2в. Наличие плавного изменения кривизны заготовки в этих сечениях способствует равномерному распределению напряжений на рассматриваемом участке заготовки.

Для начального этапа гидромеханической вытяжки соответствуют оптимальные по величине давления жидкости в полости матрицы. Так же, как в предыдущем случае (рис. 2.б), в центр кривизны срединной поверхности рассматриваемого участка в меридиональном сечении будет располагаться на пересечении нормалей, проходящих через сечения BB' и CC' , поэтому величина радиуса R_p определяется по формуле [4]

$$R_p = \frac{a - \rho}{\sin \theta} \quad (8)$$

Нормаль, совпадающая с сечением CC' , будет одновременно проходить через центр скругления кромки матрицы O_1 . Поскольку расстояние от оси симметрии до центра O_1 можно легко определить как сумму $a = R_{\pi} + r_{\pi}$, то значение a в формуле (8) можно считать строго определенным. Таким образом, различие формул (7) и (8) заключается в том, что в формуле (7) фигурирует приближенное значение расстояния a , определяемое по формуле (6), в то время как в формуле (8) искомое расстояние является постоянным по величине и строго определенным для данных конкретных условий вытяжки. Увеличение расстояния a сверх величины $a = R_{\pi} + r_{\pi}$ означало бы резкое изменение кривизны заготовки в сечениях BB' и CC' , что на практике невозможно, поэтому образование торообразного участка со значением расстояния $a > R_{\pi} + r_{\pi}$ маловероятно.

Частным случаем рассмотренных на рис. 2 схем начального этапа гидромеханической вытяжки может быть равенство радиуса кривизны R_p бесконечности, то есть $R_p = \infty$. Из уравнения Лапласа (4) следует, что при $R_p = \infty$

$$\frac{p_0}{S} = \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \quad (9)$$

Учитывая, что на начальном этапе вытяжки величина тангенциальных напряжений σ_θ незначительна, а радиус R_θ достаточно велик, можно предположить, что правая часть равенства (9) близка к нулю, а значит близка к нулю и левая часть равенства. Однако при гидромеханической вытяжке подобное невозможно, так как давление жидкости в полости матрицы $p_0 \neq 0$. Величина p_0 будет равна нулю в случае обычной вытяжки в жестких штампах, поэтому значение радиуса $R_p = \infty$ будет соответствовать этой схеме вытяжки. Это подтверждается данными работ [5, 6], в которых подробно проанализировано изменение напряженно-деформированного состояния заготовки на начальном этапе вытяжки в жестких штампах.

В рассмотренных случаях (рис. 2а,б,в) величина радиуса кривизны R_p определялась, в основном, исходя из геометрических соображений с учетом стесненности деформации представленного торообразного участка. Однако величину R_p можно определить и исходя из анализа напряженного состояния элементов рассмотренного участка.

Из условия равновесия элементов осесимметричной торообразной оболочки, нагруженной внутренним давлением p_0 , следует, что растягивающее, меридиональное напряжение σ_p определяется выражением

$$\alpha = \frac{p_0(-R_p)}{2S} \cdot \frac{2\alpha - R_p \sin \theta}{\alpha - R_p \sin \theta} \quad (10)$$

Исходя из геометрических соображений можно записать, что расстояние от центра кривизны срединной поверхности рассматриваемой оболочки в меридиональном сечении до оси симметрии a равно

$$\alpha = (R_\theta + R_p) \sin \theta \quad (11)$$

После подстановки найденного значения расстояния a из формулы (11) в выражение (10), имеем

$$\sigma_p = \frac{p_0 \cdot (-R_p)}{2 \cdot S} \cdot \frac{2 \cdot R_\theta + R_p}{R_\theta} \quad (12)$$

Найдем из выражения (12) значение давления в полости матрицы p_0

$$p_o = \frac{2 \cdot \sigma_p \cdot S \cdot R_\theta}{(-R_p) \cdot (2 \cdot R_\theta + R_p)}. \quad (13)$$

Подставив найденное значение p_o в уравнение Лапласа, представленное в виде выражения (4), после преобразований получим

$$R_p = R_\theta \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_\theta} - 2 \right) \quad (14)$$

Полученное выражение (14) связывает изменение напряжений σ_p и σ_θ в элементах торообразной оболочки с изменением радиуса кривизны R_p . Согласно выражения (14) радиус кривизны R_p будет иметь малые значения либо при малом радиусе R_θ , либо при отношении

$\frac{\sigma_p}{\sigma_\theta}$ близким к двум, либо при наличии обоих перечисленных условиях. Однако минимальное значение $R_\theta = \frac{\rho}{\sin \theta}$ ограничено строго определенной величиной $R_\theta = R_{II+} \frac{S}{2}$ (при $\theta = 90^\circ$), поэтому в большей степени на изменение R_p в сторону уменьшения будет влиять изменение отношения $\frac{\sigma_p}{\sigma_\theta}$.

Недостатком полученного для определения величины R_p выражением (14) является то, что оно не учитывает стесненность границ изменения формы участка заготовки между сечениями ВВ' и СС'. Как указывалось выше, центр радиуса кривизны R_p должен быть удален на расстояние a от оси симметрии оболочки, причем $a \leq R_m + r_m$. Сопоставление выражений (8) и (14) позволяет получить равенство

$$\frac{a}{r} + 1 = \frac{\sigma_p}{\sigma_\theta}. \quad (15)$$

Использование полученного равенства в сочетании с любым из выражений для определения R_p ((2.8) или (14)) позволяет применять любое из этих выражений для определения радиуса кривизны средней оси поверхности в меридиональном сечении участка между сечениями ВВ' и СС'.

Таким образом, кольцевой участок заготовки между сечениями ВВ' и СС' представляет собой осесимметричную оболочку двойной кривизны и переменной толщины, одна торообразная часть которой находится в контакте с пуансоном. Центры кривизны срединной поверхности оболочки для широтных сечений будут располагаться на оси симметрии оболочки. Центр кривизны срединной поверхности в меридиональном сечении для участка

оболочки между сечениями AA' и BB' удален на расстояние r_c от оси симметрии (рис. 1), а центр кривизны оставшейся части срединной поверхности в меридиональном сечении на участке между BB' и CC' будет удален на расстояние a от оси симметрии оболочки, где a , определяемое по формуле (11), не должно быть больше величины $R_M + r_M$.

Список литературы

1. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др. Под общ.ред. А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1985. 184 с.
2. Теория пластических деформаций. Е.П. Унков, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др. Под ред. Е.П. Ункова, Е.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 567 с.
3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Учеб.пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
4. Попков В.М., Лапин С.В. Изменение размеров заготовки в процессе однопереходной гидромеханической вытяжки / КШП. №7. 1988. С. 16-20.
5. Решетов В.Ф., Свидетелева А.И., Черемухина Л.Г. Анализ деформированного состояния начальной стадии процесса вытяжки // Исследование машин и технологии кузнечно-штамповочного производства. Челябинск, 1971. Вып. 89. С. 156-160.
6. Романовский В.П. Процесс образования и расчет прочности опасного сечения при глубокой вытяжке / КШП. №9. 1968. С. 24-28.