

УДК 621.983.7

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками¹

В.А. Кривошеин

Представлен расчет силы обжима трубных осесимметричных заготовок, осуществляемого с использованием матрицы, рабочая часть которой имеет кольцевые канавки. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: штамповка, обжим, матрица профилированная, канавки кольцевые, заготовка трубная, интенсификация.

The article deals with the calculation of the force of swaging of axial-symmetric tubular billets performed by means of a die with a working part with ring flutes. Results of the experimental researches are presented.

Keywords: forging, swaging, die, ring flutes, tubular billets, intensification.

Постоянной задачей при обработке металлов давлением является увеличение степени деформации, достижимой за один переход при минимальных энергозатратах. Возможности формоизменения при обжиге цилиндрических заготовок ограничены потерей устойчивости с образованием продольных или поперечных складок. Исследованные ранее методы силовой и термической интенсификации позволяют значительно повысить степень деформации, но использование этих методов ограничено размерами заготовки и параметрами техпроцесса. Предложенный способ обжима позволяет повысить степень формоизменения заготовки благодаря применению матрицы с кольцевыми канавками. Такой способ обжима не требует нагревательного оборудования и сложных конструкций штамповой оснастки.

В качестве основных теоретических предпосылок анализа использованы положения, сформулированные Е.А. Поповым в работе [1]. В начальном периоде образования контактного участка очага пластической деформации, особенно при больших углах конусности матрицы, краевая часть заготовки отходит от поверхности матрицы. Это объясняется тем, что элементы заготовки, деформированные при перемещении из участка свободного изгиба в участок, контактирующий с матрицей, имеют в меридиональном сечении определенную кривизну срединной поверхности. Для изменения кривизны необходимо

¹ Работа выполнена при консультациях чл.-корр. РАН А.М. Дмитриева.



КРИВОШЕИН
Виталий Александрович
аспирант кафедры
«Технологии обработки
металлов давлением»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

действие изгибающего момента. Поскольку на краевую часть заготовки не действуют внешние силы, способные вызвать изгибающий момент, необходимый для спрямления, изменение кривизны происходит за счет внутренних сил, вызванных окружными напряжениями σ_θ .

При использовании матрицы с кольцевыми канавками кромка обжимаемой трубной заготовки в процессе формоизменения совершает движения вовнутрь канавки, а затем наружу, находясь вне контакта с поверхностью матрицы. Такая форма рабочей поверхности матрицы наилучшим образом учитывает естественную (под действием внутренних напряжений) деформацию кромки заготовки и уменьшает поверхность контакта заготовки с матрицей. В результате эффективно снижается сила контактного трения между заготовкой и матрицей, в наиболее напряженном, из-за особенностей деформации кромки заготовки, месте.

Очаг пластической деформации для обжима в матрице с кольцевыми канавками разобьем на несколько зон (рис. 1). Зона I имеет контакт с матрицей по вершинам выступов между канавками. На этих участках, наряду с напряжениями σ_p и σ_θ , на поверхности заготовки действуют нормальные контактные напряжения σ_n . Протяженность каждого из рассматриваемых участков можно считать равной длине усеченной вершины выступа между кольцевыми канавками. Зона II образуется в результате действия спрямляющего момента и не имеет контакта с рабочей поверхностью инструмента. Пластическая деформация этого участка происходит за счет сил, действующих внутри обжимаемой заготовки. Зона III свободного изгиба находится на входе заготовки в формообразующую часть матрицы и имеет радиус R_p . Заготовка в данной зоне не соприкасается с инструментом. В зоне IV действует момент спрямления стенки заготовки, под влиянием которого она принимает коническую форму. Заготовка в этой зоне не имеет контакта с инструментом.

Таким образом, при пластическом деформировании заготовка только концевой частью деформируется в значительном контакте со ступенчатой поверхностью матрицы. Остальная

поверхность заготовки контактирует только с вершинами кольцевых выступов на поверхности матрицы.

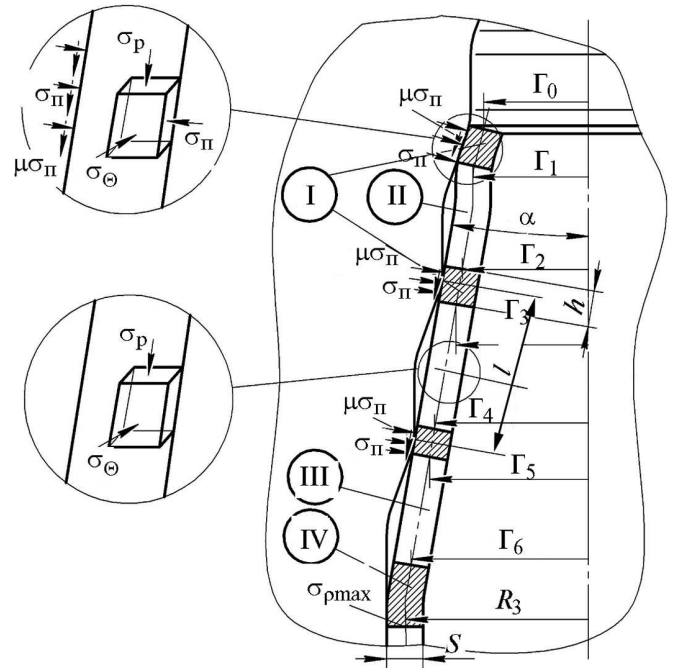


Рис. 1. Схема внутренних и внешних сил при обжиме в матрице с кольцевыми канавками и зоны в очагах пластической деформации: I — зона контакта с инструментом; II — зона изгиба-спрямления концевой части заготовки; III — зона без контакта с инструментом; IV — зона изгиба-спрямления на входе в матрицу

Определим максимальное напряжение $\sigma_{p\max}$, действующее в недеформируемых стенках заготовки, в соответствии с предложенной схемой (см. рис. 1).

Уравнение равновесия для случая осесимметричного деформирования тонкостенной заготовки имеет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta - \frac{\mu\rho}{\sin\alpha} \left(\frac{\sigma_p}{R_p} + \frac{\sigma_\theta}{R_0} \right) = 0, \quad (1)$$

где μ — коэффициент контактного трения заготовки по матрице.

Рассмотрим уравнение равновесия для каждого из участков, используя схему, изображенную на рис. 1. Примем допущение, что зона контакта в зоне I с углом наклона α прямолинейна и равен величине $h = 1/(3l)$. Тогда,

при $R_p = \infty$; $R_0 = \rho / \cos\alpha$; $\alpha = \text{const}$, получим уравнение равновесия без учета изменения толщины:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_0(1 + \mu \text{ctg}\alpha) = 0. \quad (2)$$

После совместного решения уравнения (2), учитывая условие пластичности Сен-Венана и определив произвольную постоянную из граничного условия $\sigma_p = 0$ при $\rho = r_0$ получим

$$\sigma_p = -\sigma_s(1 + \mu \text{ctg}\alpha)(1 - r_0 / \rho). \quad (3)$$

Считаем, что изгиб и спрямление с одинаковыми пределами изменения радиусов кривизны дают одинаковое увеличение меридионального напряжения на $\Delta\sigma_p$. Величина $\Delta\sigma_p$ на I зоне определяется по формуле из работы [1]:

$$\Delta\sigma_p^I = \frac{\sigma_s s}{4R_p}, \quad (4)$$

где

$$R_p = \frac{\sigma_s s}{4\sigma_p^{I-II}(1 - \cos\alpha)}.$$

При подстановке значения $\rho = r_1$ определим напряжение σ_p^{I-II} , действующее в коническом участке на границе зоны I с зоной II:

$$\sigma_p^{I-II} = -\sigma_s(1 + \mu \text{ctg}\alpha)(1 - r_0 / r_1). \quad (5)$$

Решив совместно уравнения пластичности и уравнения равновесия (1) при условии, что $\mu = 0$ для зоны изгиба-спрямления II, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma_p}{\sigma_p + \sigma_s} = -\frac{d\rho}{\rho}. \quad (6)$$

Интегрируя зоны (7), находим выражение

$$\sigma_p = \sigma_s + \frac{c_1}{\rho}. \quad (7)$$

где c_1 — постоянная.

Определим величину постоянной c_1 из условия, что $\sigma_p = \sigma_p^{I-II} + \Delta\sigma_p$ при $\rho = r_1$:

$$c_1 = \sigma_s \left[1 - (1 + \mu \text{ctg}\alpha) \left(1 - \frac{r_0}{r_1} \right) - \frac{s}{4R_p} \right], \quad (8)$$

где

$$r_1 = R_3 - 3l \sin\alpha.$$

Найденное значение постоянной (8) подставим в уравнение (7) и найдем уравнение для определения напряжения σ_p^{II} в зоне II при $\rho = r_2$:

$$\sigma_p^{II} = -\sigma_s \left[1 - \frac{r_1}{r_2} + (1 + \mu \text{ctg}\alpha) \left(1 - \frac{r_0}{r_1} \right) + \frac{s}{4R_p} \right], \quad (9)$$

где

$$r_2 = R_3 - (2l + h) \sin\alpha.$$

Решая совместно уравнения (3) при $\rho = r_3$ и (11) получим уравнение для определения напряжения σ_p^{I-III} на границе зон I и III:

$$\sigma_p^{I-III} = -\sigma_s \left[1 - \frac{r_1}{r_2} + (1 + \mu \text{ctg}\alpha) \left(2 - \frac{r_0}{r_1} - \frac{r_2}{r_3} \right) + \frac{s}{4R_p} \right], \quad (10)$$

где $r_3 = R_3 - 2l \sin\alpha$.

В зоне III стенка заготовки имеет коническую форму на протяжении всего процесса. Расчет напряжений σ_p в этой зоне проводим по формуле (3) учитывая, что $\mu = 0$:

$$\Delta\sigma_p^{III} = -\sigma_s(1 - r_3 / r_4), \quad (11)$$

где $r_4 = R_3 - (1 + h) \sin\alpha$.

Найдем выражение для σ_p в зоне III:

$$\sigma_p^{III} = -\sigma_s \left[2 - \frac{r_1}{r_2} - \frac{r_3}{r_4} + (1 + \mu \text{ctg}\alpha) \left(2 - \frac{r_0}{r_1} - \frac{r_2}{r_3} \right) + \frac{s}{4R_p} \right]. \quad (12)$$

Аналогичный подход используем для определения $\sigma_{p \max}$ на всех участках и на всем протяжении очага пластической деформации до зоны IV. Определим значение напряжения σ_p^{III-IV} для границы контакта зон III и IV:

$$\sigma_{p \max}^{III-IV} = -\sigma_s \left[n - \sum_{i=1}^n \frac{r_{2n-1}}{r_{2n}} + (1 + \mu \text{ctg}\alpha) \left(n - \sum_{i=1}^n \frac{r_{2n-2}}{r_{2n-1}} \right) + \frac{s}{4R_p} \right], \quad (13)$$

где n — число кольцевых канавок.

Учитывая влияние изгиба-спрямления при входе в матрицу получаем напряжение $\sigma_{\rho \max}$, действующее в цилиндрической недеформированной стенке заготовки:

$$\sigma_{\rho \max} = -\sigma_s \left[n - \sum_{i=1}^n \frac{r_{2n-1}}{r_{2n}} + (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \times \left(n - \sum_{i=1}^n \frac{r_{2n-2}}{r_{2n-1}} \right) + \frac{s}{4R_p} + \frac{s}{4R'_p} \right], \quad (14)$$

где

$$R'_p = \frac{\sigma_s s}{4\sigma_{\rho \max}^{\text{III-IV}} (1 - \cos \alpha)}.$$

По формуле (14) построены графики зависимости $\sigma_{\rho \max}$ от радиуса концевой части обжатой заготовки для гладкой матрицы и матрицы с тремя кольцевыми канавками (рис. 2). Расчет проведен при относительной толщине заготовки $s/(2R_3) = 0,094$. Шаг кольцевых канавок l определен по формуле

$$l = \sqrt{\frac{sr_0}{2\cos \alpha}}. \quad (15)$$

Анализ графиков показывает, что использование матрицы с кольцевыми канавками позволяет значительно снизить силу деформирования. Если условиться, что потеря устойчивости произойдет при $\sigma_{\rho \max} = -20$ МПа, то коэффициенты обжима для гладкой матрицы и матрицы с тремя кольцевыми канавками будут, соответственно $K_{\text{обж}} = 1,2$ и $K_{\text{обж. кан}} = 1,37$. Увеличение значения $K_{\text{обж}}$ в этом случае составляет 12,4%.

Для разных форм матриц был проведен эксперимент. Обжим заготовок проводился на испытательной машине Instron DX 600 номинальной силой 600 кН, в раме которой размещен динамометрический датчик. Данные с датчика записывались в программе Bluehill управления испытательной машины и выводились в виде графика силы по ходу деформирования. Заготовки, обжатые в двух типах матриц, представлены на рис. 3.

При выполнении эксперимента коэффициент обжима $K_{\text{обж. гл}} = 1,24$ для гладкой матрицы и $K_{\text{обж. ст}} = 1,35$ для матрицы с выступами. По-

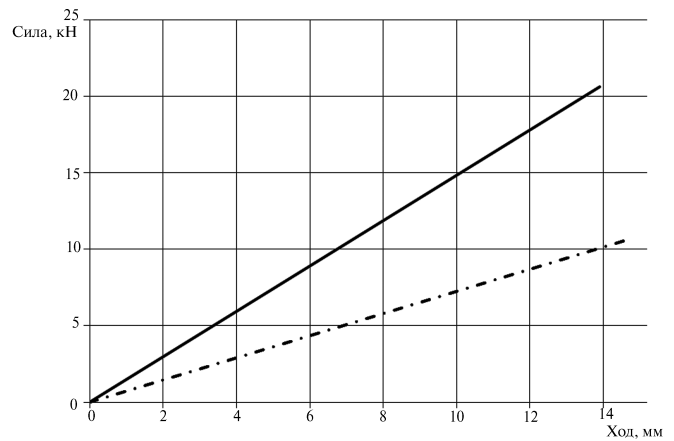


Рис. 2. Зависимость силы деформирования от перемещения, полученной по формуле (14): — для гладкой матрицы; - - - - для матрицы с тремя кольцевыми канавками

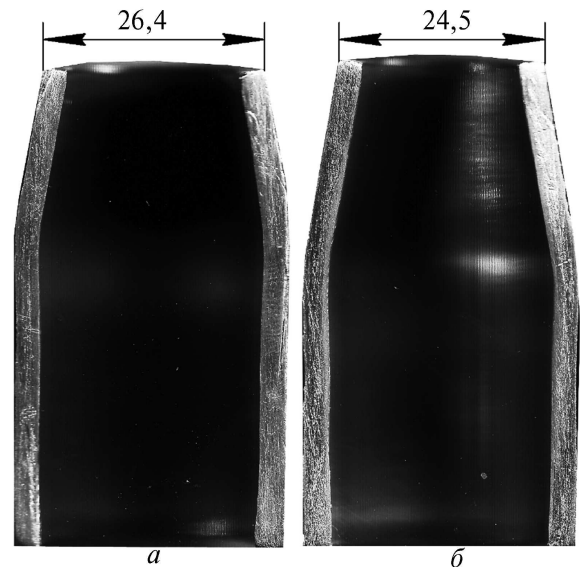


Рис. 3. Экспериментальные образцы: а — для гладкой матрицы; б — для матрицы с кольцевыми канавками

вышение коэффициента обжима составило 9%. Результаты зависимости силы деформирования от перемещения представлены на рис. 4. При обжиге в матрице с кольцевыми канавками на графике наблюдается ступенчатый характер нагружения, что объясняется влиянием изгиба-спрямления и нарушением контакта заготовки с матрицей на отдельных этапах деформирования. В целом прослеживается равномерное снижение силы деформирования от перемещения. При достижении предельной степени формоизменения снижение силы деформирования для матрицы с кольцевыми ка-

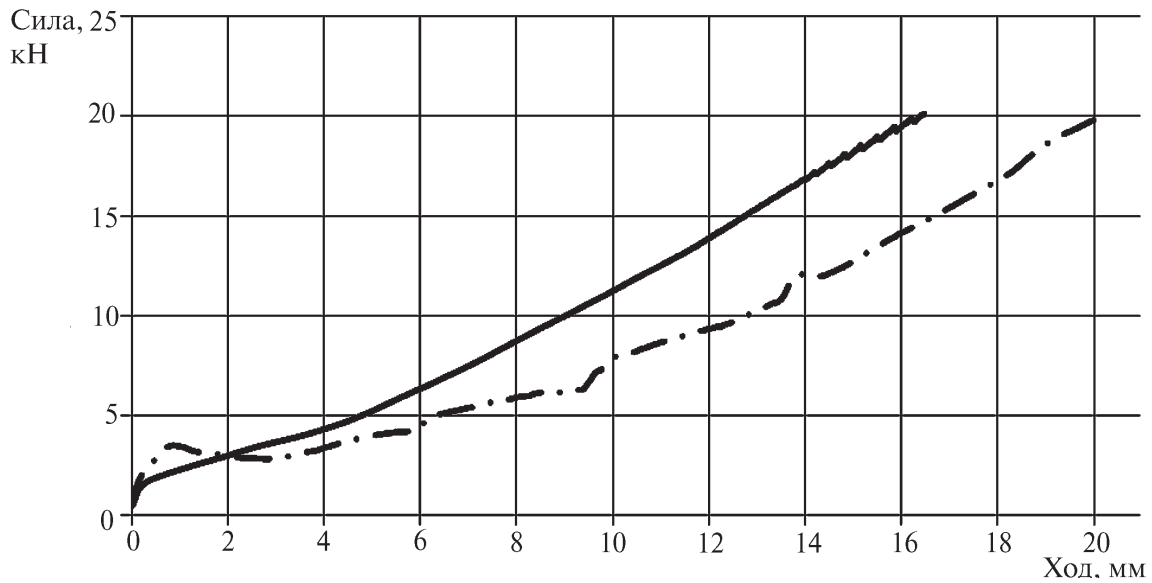


Рис. 4. Зависимость силы деформирования от перемещения, полученная на испытательной машине Instron DX 600:

— для гладкой матрицы; -·-·- для матрицы с тремя кольцевыми канавками

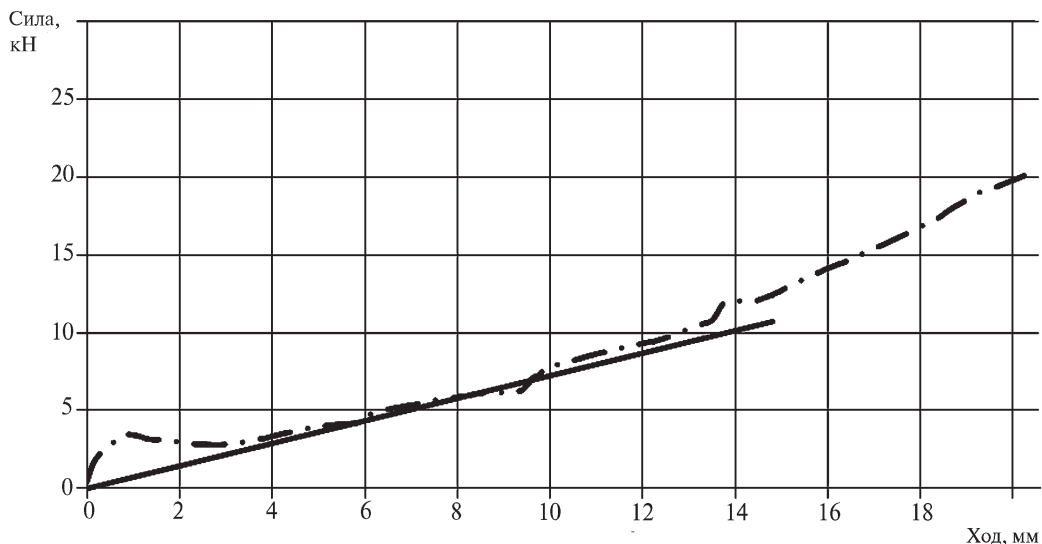


Рис. 5. Зависимость силы деформирования от перемещения для матрицы с кольцевыми канавками полученные:

— по аналитическим зависимостям; -·-·- на испытательной машине Instron DX 600

наванками достигает 25%. Аналитическое решение с высокой точностью сходится с данными полученными экспериментально, за исключением начального участка деформирования (рис. 5).

Таким образом, использование способа обжима в матрице с кольцевыми канавками позволит повысить степень формоизменения и силу деформирования, что, в свою очередь,

снизит количество технологических переходов и себестоимость изготовления детали.

Литература

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
2. Попов О.В. Основы методики теоретического анализа при штамповке деталей из труб с применением термической и силовой интенсификации // Кузнечно-штамповочное производство. 1971. № 6. С. 14–17.

Статья поступила в редакцию 07.04.2011 г.