

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_{ϕ} 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-

ние величин среднего напряжения σ на входе материала в очаг пластической деформации, радиальных σ_r , тангенциальных σ_θ , осевых σ_z и касательных $\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta z}$, $\tau_{r\theta}$ напряжений, если предварительно вычислены компоненты скоростей деформации, их интенсивность, средняя величина накопленной интенсивности деформации в очаге пластической деформации и средняя величина интенсивности напряжения σ_{icp} в очаге деформации по кривой упрочнения материала.

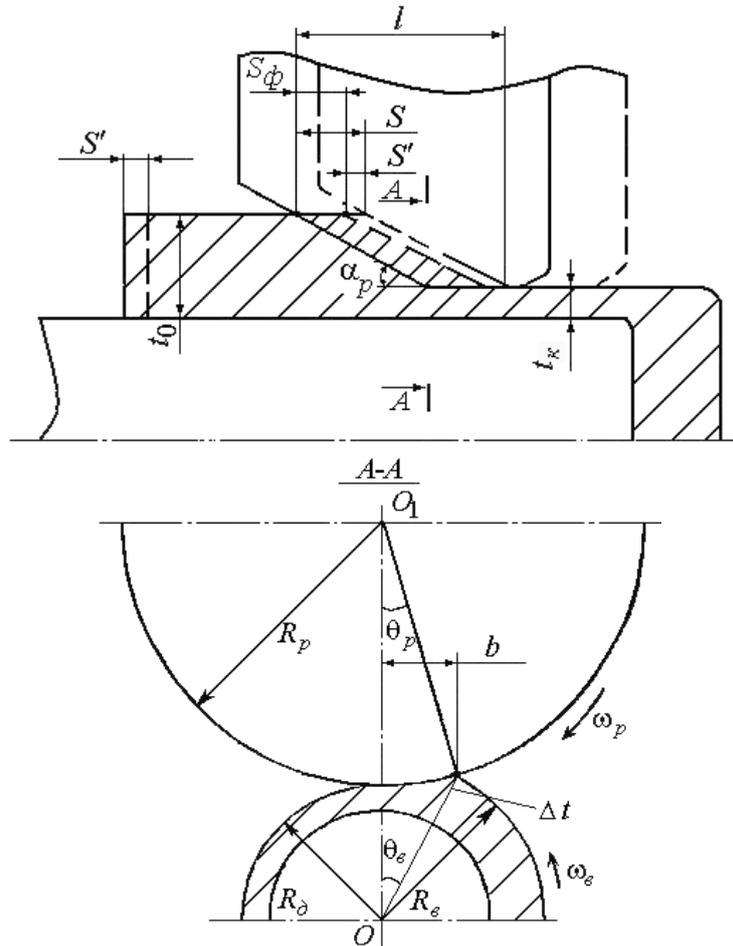


Рисунок 1. Схема очага деформации при ротационной вытяжке по прямому способу

Информация о среднем напряжении и скоростях деформации позволяет рассчитать напряженное состояние в каждой точке очага деформации. Все перечисленные выше характеристики напряженного и деформированного состояния вычислялись численно с использованием метода конечных разностей.

Уравнение линии тока для материальной точки в локальном очаге пластической деформации при ротационной вытяжке коническим роликом запишется следующим образом

$$\frac{dr}{V_r} = \frac{r d\theta}{V_\theta} = \frac{dz}{V_z}.$$

Накопленная интенсивность деформации рассматриваемой точки на выходе из локального очага пластической деформации определяется по выражению

$$\varepsilon_i = \sum_1^{N_z} \xi_{iz} \Delta t_{об i},$$

где $\Delta t_{об i}$ - время обработки материальной точки в очаге деформации на i -ом обороте шпинделя; N_z - количество оборотов шпинделя, необходимое для прохождения материальной точки от входа в локальный очаг пластической деформации до его выхода.

Время обработки материальной точки в очаге деформации на i -ом обороте шпинделя вычисляется по формуле

$$\Delta t_{об\ i} = \frac{S_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_p}{V_{Rcp}},$$

где $S_{\phi} = St_k / t_0$; S - рабочая подача; V_{Rcp} - средняя величина скорости вдавливания ролика в заготовку; V_{Ri} - скорости вдавливания ролика в заготовку в i -ом сечении;

$$V_{Rcp} = \frac{1}{\theta_{\epsilon}} \int_0^{\theta_{\epsilon}} V_{Ri} d\theta.$$

Приведенные в работе [4] выражения для определения напряженного и деформированного состояний в очаге пластической деформации позволили оценить величину накопленной повреждаемости ω_e и предельные возможности формоизменения процесса ротационной вытяжки с утонением стенки коническими роликами ϵ_{np} .

Величина повреждаемости материала ω_e при пластическом деформировании по деформационной модели разрушения определяется по формуле

$$\omega_e = \int_0^{\epsilon_i} \frac{d\epsilon_i}{\epsilon_{i\ np}}, \quad (1)$$

где $d\epsilon_i$ - величина приращения интенсивности деформации на i -ом обороте шпинделя; $\epsilon_{i\ np} = \epsilon_{i\ np}(\sigma / \sigma_i)$ - предельная интенсивность деформации; σ - среднее напряжение; σ_i - интенсивность напряжения.

Величина предельной интенсивности деформации $\epsilon_{i\ np}$ находится по выражению

$$\epsilon_{i\ np} = \Omega \exp\left(U \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma),$$

где Ω , U - константы деформируемого материала, определяемые в зависимости от рода материала, согласно работам В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова [5, 6]; α , β , γ - углы между первой главной осью напряжений и главными осями анизотропии x , y и z ; a_0 , a_1 , a_2 и a_3 - константы материала, зависящие от анизотропии механических свойств материала заготовки и определяемые из опытов на растяжение образцов в условиях плоского напряженного состояния.

В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать величины χ , т.е.

$$\omega_e \leq \chi. \quad (2)$$

До деформации (при $t = t_0$) $\omega_e = 0$, а в момент разрушения ($t = t_p$) $\omega_e = \chi = 1$. При назначении величины степени деформации учитывались рекомендации по степени использования запаса пластичности В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова [5, 6]: $\chi = 0,25$ - для ответственных деталей, работающих и подвергающихся после обработки давлением термической обработке (отжигу или закалке); $\chi = 0,65$ - для неответственных деталей.

Расчеты выполнены для трубной заготовки из стали 12Х3ГНМФБА с наружным радиусом трубной заготовки $R_{\epsilon} = 64,15$ мм, толщиной стенки трубы $t_0 = 6,05$ мм; диаметром ролика $D_p = 280$ мм; частотой вращения шпинделя $n = 75$ мин⁻¹. Механические характеристики стали 12Х3ГНМФБА приведены в работе [7]. Технологические параметры и геометрия ролика ро-

тационной вытяжки изменялись в следующих диапазонах: степень деформации $\varepsilon=0,1...0,6$; угол конусности ролика $\alpha_p = 10...30^\circ$; коэффициент трения на оправке $\mu_o = 0,05...0,2$.

На рисунке 2 и 3 приведены графические зависимости изменения накопленной повреждаемости ω_e в материале готовой детали от рабочей подачи S и углов конусности ролика α_p .

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей показывает, что с уменьшением угла конусности ролика α_p , рабочей подачи S и увеличением степени деформации ε величина накопленных микроповреждений ω_e возрастает. Максимальная величина накопленных микроповреждений ω_e соответствует точкам, принадлежащим наружной поверхности изготавливаемой детали.

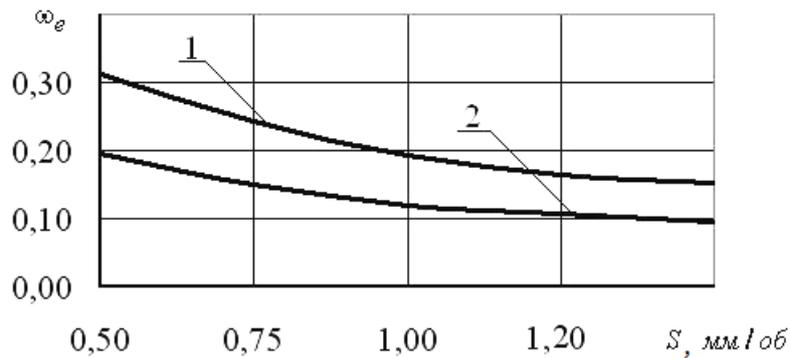


Рисунок 2. Зависимости изменения ω_e от S : кривая 1 – при $r = r_e$; кривая 2 – при $r = r_0$ ($\varepsilon = 0,4$; $\alpha = 10^\circ$; $z = 0$)

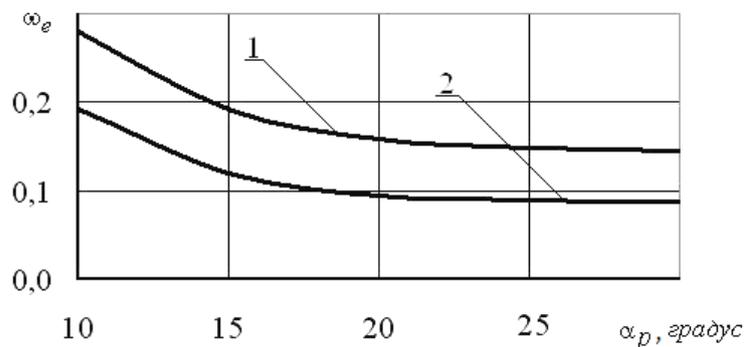


Рисунок 3. Зависимости изменения ω_e от α_p : кривая 1 – при $r = r_e$; кривая 2 – при $r = r_0$ ($\varepsilon = 0,4$; $S = 1$ мм/об; $z = 0$)

Предельные возможности процесса ротационной вытяжки с утонением стенки оценивались допустимой величиной степени использования ресурса пластичности по выражению (2), максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из локального очага пластической деформации

$$\sigma_z \leq 2\tau_{s\theta z} \sqrt{1 - c_{\theta z}}, \quad (2)$$

а также по критерию шейкообразования тонкостенной трубной заготовки, полученному на основе критерия положительности добавочных нагрузок: $dP = 0$; $dM = 0$ [7]. Здесь $\tau_{s\theta z}$ и $c_{\theta z}$ - сопротивление материала на сдвиг и характеристика анизотропии в условиях плоской деформации.

Предельные степени деформации ε_{np} исследовались в зависимости от угла конусности ролика α_p , рабочей подачи S и геометрических размеров трубной заготовки путем числен-

ных расчетов на ЭВМ.

Графические зависимости изменения предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по допустимой величине степени использования ресурса пластичности (при $\chi = 1$), максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из локального очага пластической деформации, а также критерию шейкообразования тонкостенной трубной заготовки при ротационной вытяжке трубных заготовок из стали 12ХЗГНМФБА, от угла конусности ролика α_p и рабочей подачи S приведены на рисунке 4 и 5 соответственно. Здесь введены следующие условные обозначения: кривая 1 – соответствует результатам расчетов предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага деформации; кривая 2 - по критерию шейкообразования тонкостенной трубной заготовки; кривая 3 - по допустимой величине степени использования ресурса пластичности (при $\chi = 1$).

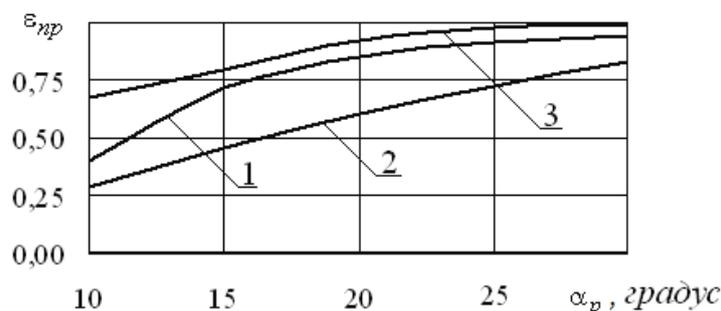


Рисунок 4. Зависимости изменения ε_{np} от α_p для стали 12ХЗГНМФБА ($S = 1$ мм/об)

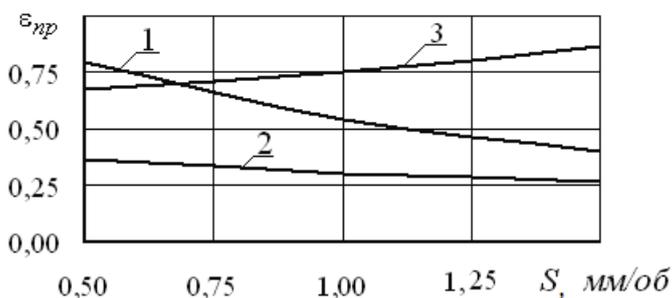


Рисунок 5. Зависимости изменения ε_{np} от S для стали 12ХЗГНМФБА ($\alpha_p = 10^\circ$)

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что с увеличением угла конусности ролика α_p от 10° до 30° предельная степень деформации ε_{np} , вычисленная по максимальной величине осевого напряжения на выходе из локального очага пластической деформации, увеличивается в 2 раза, а увеличение рабочей подачи S от 0,5 мм/об до 1,5 мм/об – ведет к уменьшению предельной степени деформации ε_{np} от 0,80 до 0,35.

Установлено, что основное влияние на изменение предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по критерию шейкообразования тонкостенной трубной заготовки, оказывает влияние на угол конусности ролика α_p . Увеличение угла конусности ролика α_p сопровождается ростом предельной степени деформации ε_{np} . Величина рабочей подачи S не оказывает существенного влияния на изменение предельной степени деформации ε_{np} , вычисленной по критерию шейкообразования тонкостенной трубной заготовки.

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей, приведенных на рисунке 4 и 5, показывает, что предельные степени деформации ε_{np} при ротационной вытяжке могут

ограничиваться максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из локального очага пластической деформации, критерием шейкообразования тонкостенной трубной заготовки и допустимой величиной степени использования ресурса пластичности. Этот факт зависит от механических свойств материала цилиндрической заготовки и технологических параметров процесса ротационной вытяжки с утонением.

Установлено, что предельные возможности процесса ротационной вытяжки ε_{np} трубных заготовок из стали 12Х3ГНМФБА ограничиваются критерии шейкообразования (рисунок 2 и рисунок 3). При этом использование заготовок из стали 10 ограничивает предельные возможности процесса как по допустимой величине степени использования запаса пластичности ($S < 0,8$ мм/об), так и по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации ($S > 0,8$ мм/об) при $\alpha_p = 10^\circ$.

Таким образом, авторами выявлено влияние технологических параметров на величину накопленных микрповреждений и предельные возможности формоизменения по различным критериям разрушения операции ротационной вытяжки с утонением стенки анизотропного материала.

Работа выполнена по государственным контрактам в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы и грантам РФФИ.

Литература

1. Баркая В.Ф., Рокотян С.Е., Рузанов Ф.И. Формоизменение листового материала. М.: Металлургия. 1976. 294 с.
2. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.: Машиностроение. 1971. 239 с.
3. Могильный Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. М.: Машиностроение. 1983. 190 с.
4. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. №12. С. 10-17.
5. Богатов А. А., Мижирицкий О.И., Смирнов В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.
7. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании / Под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 265 с.

Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем

к.т.н. Алиева Л.И., Грудкина Н.С.
ДГМА, г. Краматорск, Украина
pnir@dgma.donetsk.ua

Анотация. Предложена математическая модель процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа стакан с фланцем, позволяющая определять энергосиловые параметры процесса и исследовать поэтапное и конечное формоизменение заготовки. Проведен сравнительный анализ картин поэтапного формоизменения на основе предложенной расчетной схемы, конечно-элементного моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: фланец; выдавливание; энергосиловые параметры; формоизменение.