

УДК 539.374; 621.983

Яковлев С. С.
Трегубов В. И.
Ремнев К. С.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

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].

Целью работы является исследование влияния технологических параметров на величину накопленных микрповреждений и предельные возможности формоизменения по различным критериям разрушения операции ротационной вытяжки с утонением стенки анизотропного материала.

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 (рис. 1). В отличие от известных подходов к анализу кинематики течения материала в очаге пластической деформации 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 распределение 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.

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.

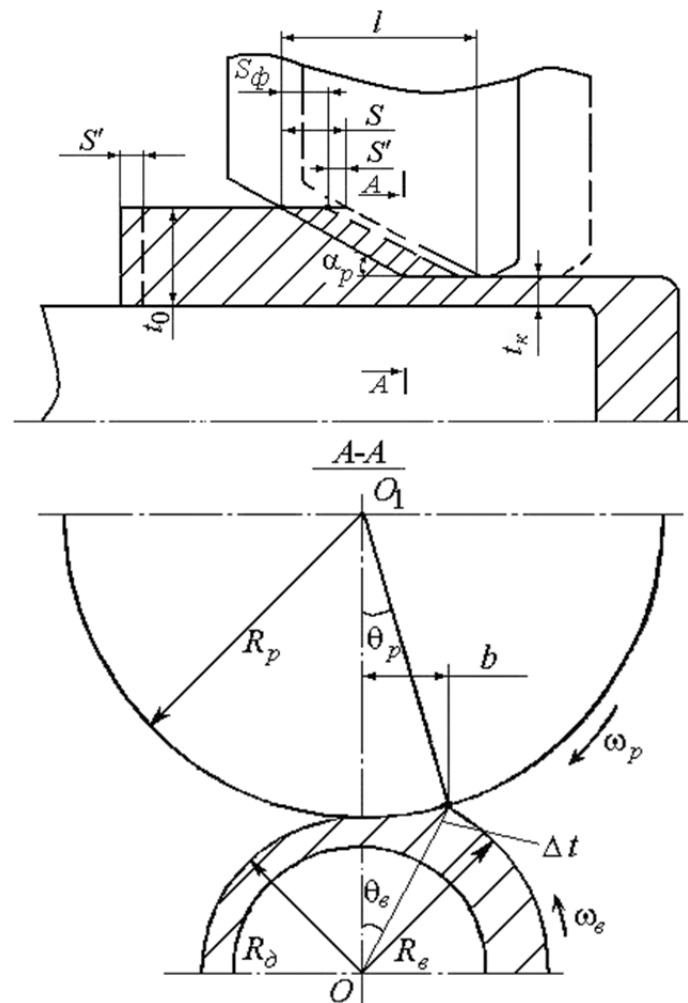


Рис. 1. Схема очага деформации при ротационной вытяжке по прямому способу

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:

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

где $\Delta t_{обi}$ – 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:

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

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;

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

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:

$$\omega_e = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{inp}}, \quad (1)$$

где $d\varepsilon_i$ – величина приращения интенсивности деформации на i -ом обороте шпинделя;

$\varepsilon_{inp} = \varepsilon_{inp}(\sigma / \sigma_i)$ – предельная интенсивность деформации;

σ – среднее напряжение;

σ_i – интенсивность напряжения.

Величина предельной интенсивности деформации ε_{inp} находится по выражению:

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

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 $R_g = 64,15$ 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 ротационной вытяжки изменялись в следующих диапазонах: степень деформации $\varepsilon = 0,1...0,6$; угол конусности ролика $\alpha_p = 10...30^\circ$; коэффициент трения на оправке $\mu_0 = 0,05...0,2$.

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

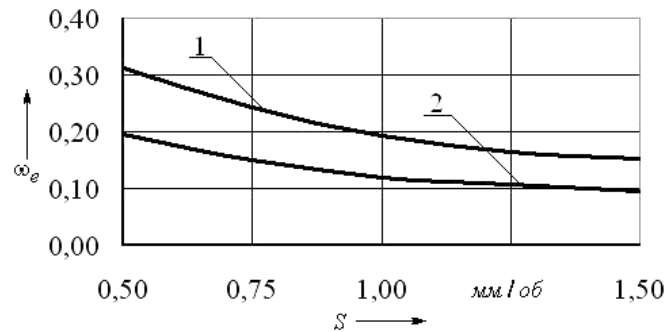


Рис. 2. Графические зависимости изменения ω_e от S :

кривая 1 – при $r = r_e$; кривая 2 – при $r = r_0$ ($\varepsilon = 0,4$; $\alpha = 10^\circ$; $z = 0$)

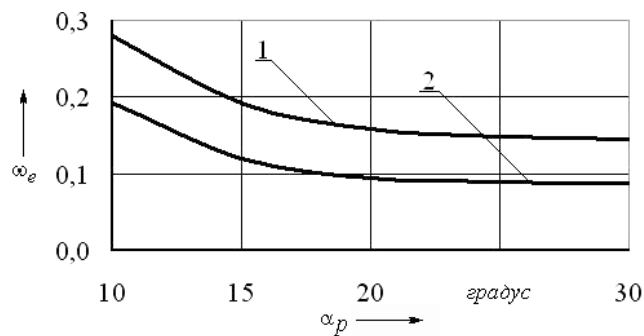


Рис. 3. Графические зависимости изменения ω_e от α_p :

кривая 1 – при $r = r_e$; кривая 2 – при $r = r_0$ ($\varepsilon = 0,4$; $S = 1$ мм/об; $z = 0$)

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.

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:

$$\sigma_z \leq 2\tau_{s\theta z} \sqrt{1 - c_{\theta z}}, \quad (3)$$

а также 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 численных 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 12Х3ГНМФБА от угла конусности ролика α_p и рабочей подачи S приведены на рис. 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 $\chi = 1$).

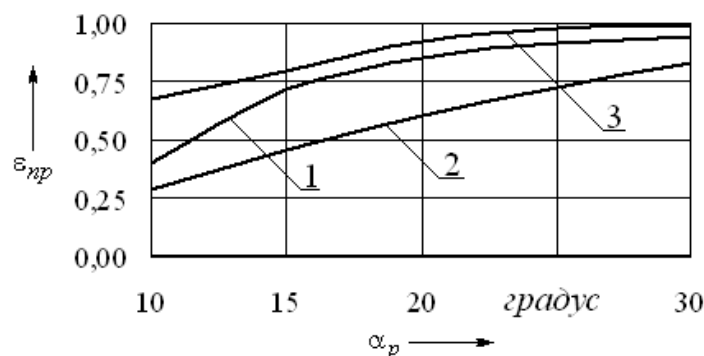


Рис. 4. Графические зависимости изменения ε_{np} от α_p для стали 12Х3ГНМФБА ($S=1$ мм/об)

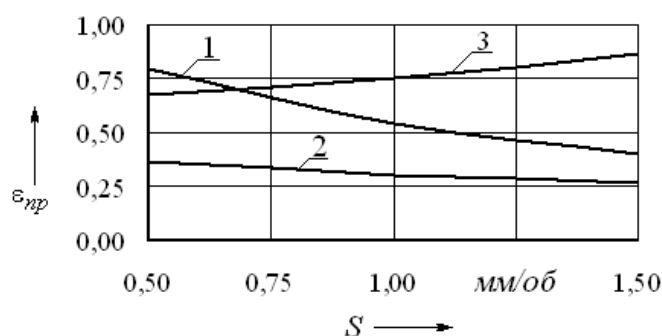


Рис. 5. Графические зависимости изменения ε_{np} от S для стали 12Х3ГНМФБА ($\alpha_p = 10^\circ$)

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 – 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 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 рис. 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 12Х3ГНМФА ограничиваются критерии шейкообразования (рис. 2 и рис. 3), а из стали 10, как допустимой величиной степени использования ресурса пластичности ($S < 0,8$ мм/об), так и как максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации ($S > 0,8$ мм/об) при $\alpha_p = 10^\circ$.

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

ВЫВОДЫ

Приведен анализ влияния технологических параметров на величину накопленных микрповреждений и предельные возможности формоизменения по различным критериям разрушения операции ротационной вытяжки с утонением стенки анизотропного материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ;

Трегубов В. И. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ;

Ремнев К. С. – канд. техн. наук, доц., докторант ТулГУ.

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 29.02.2012 г.