

УДК 621.983

И. О. Сивак, д. т. н., проф.; С. И. Сухоруков, к. т. н., доц.; Е. И. Шевчук

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Проведены исследования напряженного состояния в очаге деформации при ротационной вытяжке осесимметричных деталей из листовой заготовки. Установлены закономерности распределения показателей напряженного состояния в очаге деформации и определена величина использованного ресурса пластичности в зависимости от геометрических характеристик ролика, толщины листовой заготовки и механических характеристик материала заготовки.

Ключевые слова: ротационная вытяжка, напряжение, очаг деформации, показатели напряженного состояния, коническая деталь.

В различных отраслях машиностроения нашли широкое применение осесимметрические тонкостенные изделия, к качеству и эксплуатационным свойствам которых предъявляют высокие требования. Для изготовления таких изделий широко применяют методы ротационной вытяжки. На сегодняшний день целый ряд работ посвящен экспериментальным исследованиям процесса ротационной вытяжки [1 – 3], но при этом практически отсутствуют методы оценки схемы напряженного состояния и величины использованного ресурса пластичности в очаге деформации и их влияния на качество готовых изделий.

Необходимо отметить, что особенность процесса ротационной вытяжки осесимметрических деталей из листовых заготовок заключается в том, что пластическая деформация протекает в локальном объеме контакта инструмента и заготовки. Схема напряженного состояния в этом объеме зависит от формы и размеров заготовки и инструмента, взаимного их размещения и режимов обработки.

Цель данной работы заключается в определении закономерностей распределения показателей напряженного состояния и величины использованного ресурса пластичности в очаге деформации в зависимости от параметров процесса ротационной вытяжки.

В работе рассмотрен процесс ротационной вытяжки тонкой оболочки из листовой заготовки. При этом очаг деформации разбит на три участка (рис. 1). Участок 1 находится в условиях объемного напряженного состояния, а на участке 2 имеет место плоская деформация. В зону 3 отнесен фланец, который находится в условиях плоского напряженного состояния. В работе [4, 5] определено напряженное состояние для участка 2 в полярной системе координат ρ , α с началом координат в центре кривизны рабочей поверхности ролика (рис. 2). В выделенном элементе заготовки, ограниченном радиусами ρ_1 , ρ_2 , и углами $\alpha=0$, $\alpha=\alpha_m$, действуют радиальные напряжения σ_ρ , тангенциальные напряжения σ_α и касательные напряжения $\tau_{\rho\alpha}$. Разница радиусов ρ_2 и ρ_1 равна толщине листовой заготовки δ .

Уравнения равновесия для плоской задачи в полярных координатах имеют вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \alpha} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\alpha}{\rho} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial \alpha} + \rho \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \rho} + 2\tau_{\rho\alpha} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Условие пластичности в данной задаче принимает вид:

$$\sigma_\alpha - \sigma_\rho = 2\tau_s. \quad (2)$$

После дифференцирования первого уравнения системы (1) по α с учетом условия пластичности (2) и после дифференцирования второго уравнения системы (1) по ρ и вычитания из полученного второго уравнения первого получено уравнение для определения касательных напряжений [4, 5]

$$\rho^2 \cdot \frac{\partial^2 \tau_{\rho\alpha}}{\partial \rho^2} - \frac{\partial^2 \tau_{\rho\alpha}}{\partial \alpha^2} + 3\rho \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \rho} = 0. \quad (3)$$

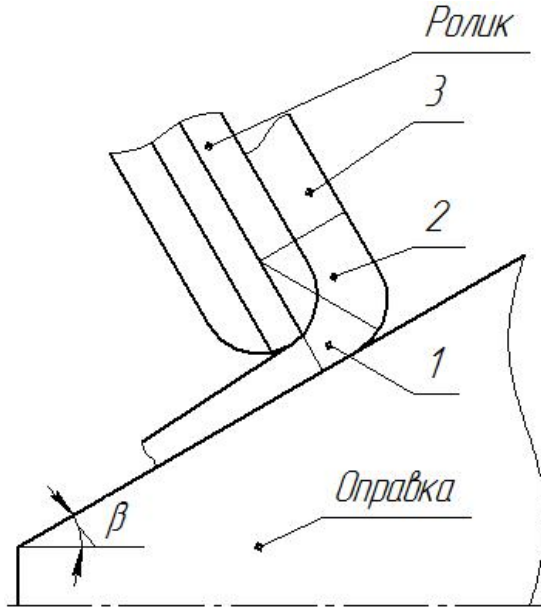


Рис. 1. Схема деления ячейки деформации на участки

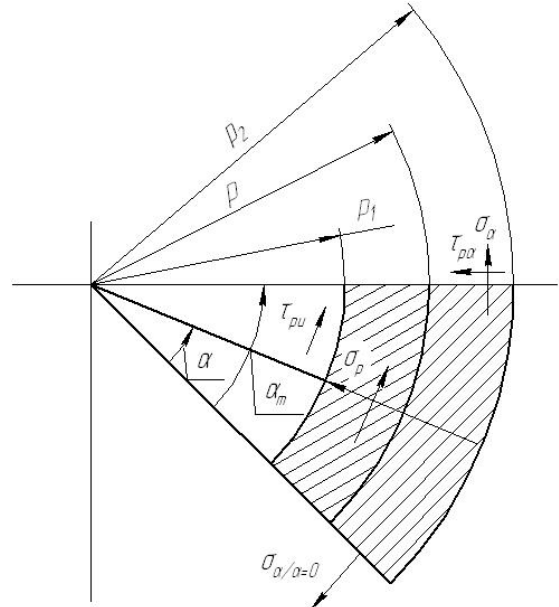


Рис. 2. Схема напряженного состояния на участке 2 при ротационной вытяжке

Решение уравнения (3) получено при следующих граничных условиях. В зоне контакта заготовки и ролика при $\rho=\rho_1$ касательные напряжения равны: $\tau_{\rho\alpha} = -m\tau_s$, где m – фактор трения Прандля. На свободной поверхности заготовки при $\rho=\rho_2$ касательные напряжения $\tau_{\rho\alpha}=0$. При $\alpha=0$ касательные напряжения $\tau_{\rho\alpha}=0$, так как данная площадка является главной, а при $\alpha=\alpha_m$ касательные напряжения принимают максимальное значение $\tau_{\rho\alpha} = -\tau_s$. После решения уравнения (3) при принятых граничных условиях в работе [5] для касательного напряжения $\tau_{\rho\alpha}$ получено следующее выражение

$$\tau_{\rho\alpha} = -\tau_s \sqrt{1-c} \frac{\alpha}{\alpha_m} + \frac{\tau_s \sqrt{1-c} \cdot \sin\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right)}{\rho \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} \cdot \left[\rho_1 \left(m - \frac{\alpha}{\alpha_m} \right) \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_2}\right) + \rho_2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_m} \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_1}\right) \right]. \quad (4)$$

Для определения σ_ρ задача (1) решена в [4, 5] с использованием метода разделения переменных при однородных граничных условиях:

$$\sigma_\rho = \frac{\tau_s \cdot \sqrt{1-c}}{\alpha_m} \cdot \left[\ln \frac{\rho}{\rho_2} + \left(\frac{\rho_1}{\rho(1+\omega^2)} \cdot \frac{\sin\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_2}\right) + \omega \cdot \cos\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_2}\right)}{\sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} - \frac{\rho_1 \cdot \omega}{\rho_2(1+\omega^2) \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} \right) \right] \times$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left[\pi \cdot \cos\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right) \left(m - \frac{\alpha}{\alpha_m}\right) - \sin\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right) \right] + \\
 & + \left[\frac{\rho_2 \left(\sin\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_1}\right) + \omega \cdot \cos\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_1}\right) \right)}{\rho(1+\omega^2) \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} - \frac{\sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) + \omega \cdot \cos\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{(1+\omega^2) \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} \right] \times \\
 & \times \left\{ \frac{\pi\alpha}{\alpha_m} \cdot \cos\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right) + \sin\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right) \right\} + 2\tau_s \cdot \sqrt{1-c} \ln \frac{\rho}{\rho_2}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Нормальное напряжение σ_α определяли с уравнения (2).

В данной работе полученные значения σ_α , σ_ρ , $\tau_{\rho\alpha}$ использованы для анализа схемы напряженного состояния в зоне 2 очага деформации и оценки предельно допустимого формоизменения. При этом показатель напряженного состояния η рассчитывали по формуле [6, 7]

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad (6)$$

где $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{i,j} \cdot \delta_{i,j}$ – среднее напряжение, σ_u – интенсивность напряжений.

Параметр Надаи-Лоде равен:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (7)$$

Главные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 рассчитывали по формуле [6]:

$$\sigma_{\frac{max}{min}} = \frac{\sigma_\alpha + \sigma_\rho}{2} \pm \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\rho)^2 + 4\tau_{\rho\alpha}^2}. \quad (8)$$

В работе получены закономерности распределения показателя напряженного состояния η и параметр Надаи-Лоде μ_σ в очаге деформации в зависимости от радиуса ρ и угла α для листовых заготовок толщиной $\delta=0,8$ мм, $\delta=1,0$ мм и $\delta=1,2$ мм из алюминия АД1 и стали 10. Расчеты выполнены для радиусов рабочей поверхности ролика $R_{рол}=1,5$ мм и $R_{рол}=4,0$ мм. Угол оправки β приняли равным $\beta=45^\circ$.

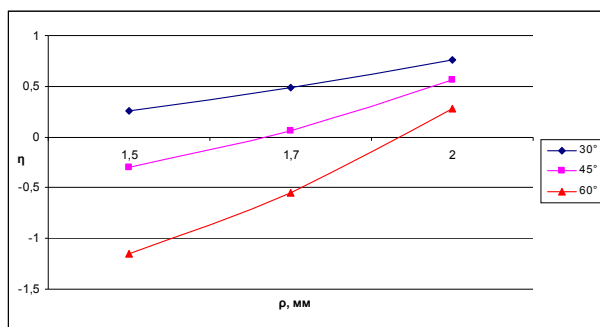


Рис. 3. Распределение показателя напряженного состояния η в очаге деформации в зависимости от радиуса ρ и угла α при толщине заготовки $\delta=0,8$ мм

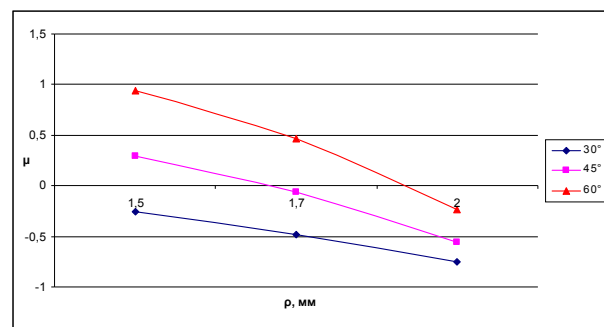


Рис. 4. Распределение параметра Надаи-Лоде μ_σ в очаге деформации в зависимости от радиуса ρ и угла α при толщине заготовки $\delta=0,8$ мм

Результаты расчета для ролика с радиусом рабочей поверхности $R_{рол}=1,5$ мм и различных

толщин листовой заготовки приведены на (рис. 3 – 8). Из анализа полученных результатов следует, что закономерности распределения показателей η и μ_σ по объему очага деформации не зависят от материала листовой заготовки. Как видно из приведенных на рис. 3 – 8 зависимостей, показатель напряженного состояния η возрастает с увеличением радиуса ρ и уменьшается при увеличении угла α . Параметр Надаи-Лоде μ_σ уменьшается с ростом радиуса ρ и возрастает при увеличении угла α . Например, при $\delta=0,8$ мм $R_{пол}=1,5$ мм при изменении ρ от $\rho=1,5$ мм до $\rho=2,0$ мм показатель η возрастает от $\eta=-1,152$ до $\eta=0,283$ при $\alpha=60^\circ$ и от $\eta=0,258$ до $\eta=0,755$ при $\alpha=30^\circ$ (рис. 3). Параметр Надаи-Лоде μ_σ уменьшается при тех же условиях от $\mu_\sigma=0,939$ до $\mu_\sigma=-0,239$ при $\alpha=60^\circ$ и от $\mu_\sigma=-0,253$ до $\mu_\sigma=-0,755$ при $\alpha=30^\circ$ (рис. 4). При фиксированном значении радиуса ρ , например, при $\rho=1,5$ мм показатель η уменьшается от $\eta=0,258$ до $\eta=-1,152$ при возрастании α от $\alpha=30^\circ$ до $\alpha=60^\circ$ (рис. 3), а параметр Надаи-Лоде μ_σ при тех же условиях возрастает от $\mu_\sigma=-0,253$ до $\mu_\sigma=0,939$ (рис. 4). С ростом толщины листовой заготовки значение показателя η уменьшается, а параметр Надаи-Лоде μ_σ возрастает (рис. 3 – 8), то есть чем больше толщина заготовки, тем мягче схема напряженного состояния в очаге деформации и тем меньше интенсивность накопления повреждений и, соответственно, меньше величина использованного ресурса пластичности. Такой результат является важным, так как полученную коническую заготовку планируют использовать в дальнейшем для изготовления детали более сложной формы путем последующей пластической деформации.

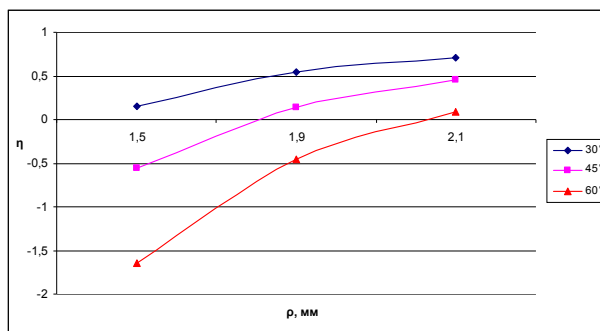


Рис. 5. Распределение показателя напряженного состояния η в очаге деформации в зависимости от радиуса ρ и угла α при толщине заготовки $\delta=1,0$ мм

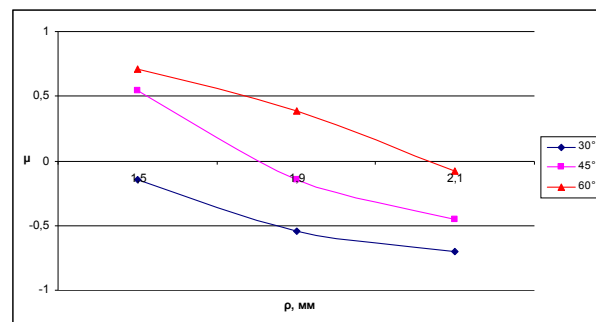


Рис. 6. Распределение параметра Надаи-Лоде μ_σ в очаге деформации в зависимости от радиуса ρ и угла α при толщине заготовки $\delta=1,0$ мм

При использовании для ротационной вытяжки ролика с радиусом рабочей поверхности $R_{пол}=4,0$ мм характер зависимостей показателя напряженного состояния η и параметра Надаи-Лоде μ_σ от радиуса ρ и угла α аналогичные приведенным на рис. 3 – 8. Однако численные значения показателя η в среднем на (75 – 80)% больше, а численные значения параметра Надаи-Лоде μ_σ на (60 – 80)% меньше численных значений этих величин, приведенных на рис. 3 – 8.

Анализ результатов расчета напряженного состояния показывает, что нагрузка в очаге деформации близка к простой, поэтому величину использованного ресурса пластичности ψ можно определить по критерию Г. А. Смирнова-Аляева [8]:

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (9)$$

где e_u – степень деформации, e_p – предельная деформация для данной схемы напряженного состояния.

Способность материала заготовки к пластической деформации без разрушения при ротационной вытяжке принято характеризовать величиной утончения, которая для деформируемого металла при данной схеме напряженного состояния не должна превышать предельной деформации e_p . В общем случае величину утончения определяют зависимостью

[9]:

$$e_u = \ln \frac{h_0}{h}, \quad (10)$$

где h_0 – начальная толщина листовой заготовки, h – толщина стенки детали после ротационной вытяжки.

Зависимость пластичности от схемы напряженного состояния описывали поверхностями предельных деформаций, которые для исследуемых материалов аппроксимировали зависимостями [10]:

для стали 10

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0.78 \exp(0.59 \cdot \mu_\sigma - 0.71 \cdot \eta), \quad (11)$$

для сплава алюминия АД1

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1.2 \exp(0.42 \cdot \mu_\sigma - 0.5 \cdot \eta). \quad (12)$$

Расчет граничных деформаций e_p по критерию (9) показал, что максимально допустимая величина утончения, при которой материал не будет разрушаться, для листовых заготовок из стали 10 при заданных условиях формоизменения не превышает $e_p \leq 0.35$ при радиусе рабочей поверхности ролика $R_{рол} = 1.5$ мм и $e_p \leq 0.26$ при $R_{рол} = 4$ мм. Для заготовок из сплава алюминия АД1 максимально допустимая величина утончения не превышает $e_p \leq 0.60$ при $R_{рол} = 1.5$ мм и $e_p \leq 0.50$ при $R_{рол} = 4$ мм.

Для исследованных толщин листовых заготовок $\delta = 0.8$ мм, $\delta = 1.0$ мм, $\delta = 1.2$ мм максимально допустимая величина утончения практически не зависит от толщины заготовки.

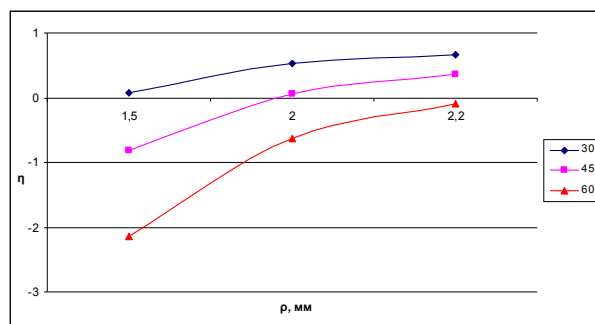


Рис. 7. Распределение показателя напряженного состояния η в очаге деформации в зависимости от радиуса r и угла α при толщине заготовки $\delta = 1.2$ мм

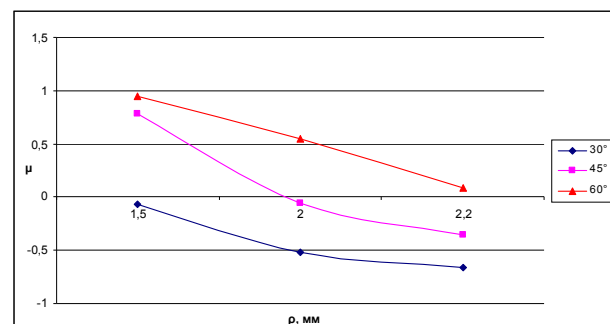


Рис. 8. Распределение параметра Надаи-Лоде μ_σ в очаге деформации в зависимости от радиуса r и угла α при толщине заготовки $\delta = 1.2$ мм

Выводы

Установлено, что при ротационной вытяжке листовых заготовок с ростом толщины заготовки показатель η уменьшается, а параметр Надаи-Лоде μ_σ растет. При увеличении радиуса рабочей поверхности ролика показатель η в очаге деформации также растет, а параметр Надаи-Лоде μ_σ уменьшается независимо от толщины. Необходимо отметить, что материал заготовки не влияет на характер распределения показателей η и μ_σ в очаге деформации. Величина использованного ресурса пластичности ψ в очаге деформации возрастает с увеличением радиуса рабочей поверхности ролика $R_{рол}$ и мало зависит от толщины заготовки при прочих равных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маленичев А. С. Взаимосвязь конструктивных характеристик оборудования и технологической оснастки Наукові праці ВНТУ, 2014, № 4

для ротационной вытяжки с параметрами качества получаемых изделий / А. С. Маленичев // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – 2000. – С. 215 – 221.

2. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Могильный Н. И. – М. : Машиностроение, 1983. – 190 с.

3. Трегубов В. И. Силовые режимы ротационной вытяжки цилиндрических деталей на специализированном оборудовании / В. И. Трегубов, С. П. Яковлев, С. С. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2005. – № 1. – С. 17 – 23.

4. Дудка Д. В. Ротационное формоизменение конических деталей из анизотропных материалов / Д. В. Дудка, С. С. Яковлев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – С. 3 – 11.

5. Драбик А. Н. Ротационная вытяжка конических деталей из анизотропных заготовок : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Драбик Андрей Николаевич. – Тула, 2010. – 207 с.

6. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / Огородников В. А. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.

7. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.

8. Смиронов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Смирнов-Аляев Г. А. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.

9. Капорович В. Г. Производство деталей из труб обкаткой / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1978. – 166 с.

10. Сивак И. О. Пластичность металлов при объемном напряжённом состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбинская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – 2007. – С. 73 – 76.

Сивак Иван Онуфриевич – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии и автоматизации машиностроения, sivak_i_o@mail.ru.

Сухоруков Сергей Иванович – к. т. н., доцент кафедры технологии и автоматизации машиностроения, ssergeii@ukr.net.

Шевчук Евгений Игоревич – аспирант кафедры технологии и автоматизации машиностроения, Shevae_111@mail.ru.

Винницкий национальный технический университет.