УДК 621.981.011

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШТАМПОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4 И СТАЛИ 12X18H10T

© 2017 И.П. Попов, В.Д. Маслов, Кир. А. Николенко, Кон. А. Николенко

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 30.15.2017

Представлены результаты обработки компьютерного моделирования и определения предельной степени деформации по критерию Колмогорова. Выполнен вывод зависимости для оценки разрушения малопластичных материалов на торце при угле гиба 90°.

Ключевые слова: крутоизогнутый отвод, компьютерная модель, ANSYS/LS-DYNA, гофрообразование, критерий разрушения, напряжения, деформации, толщина, экспериментальные исследования.

В конструкциях летательных аппаратов при изготовлении трубопроводных систем, в химической, фармацевтической, нефтеперерабатывающей промышленности широко применяются крутоизогнутые отводы (патрубки) из коррозионно-стойких сталей, титановых и алюминиевых сплавов с относительной толщиной стенки 0,02...0,04 и относительным радиусом кривизны 1...1,5. Внешний вид отводов с различными углами гиба представлен на рис. 1.

Характерными особенностями рассматриваемых деталей является их геометрическая форма, которая приводит к высокой неравномерности деформаций в процессе формообразования. Подобная неравномерность деформаций может привести к двум основным видам брака: 1. гофрообразование на боковой поверхности изделия; 2. разрушение изделия на выходном торце по минимальному радиусу гиба. При штамповке отводов в холодном состоянии, с применением жесткой инструментальной оснастки на универсальном оборудовании можно создать условия, исключающие возникновение подобного вида дефектов (Патент RU 2294807 C1. 2007 г. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов).

Условием, препятствующем возникновение гофр является жесткий гарантированный зазор, образованный внутренней поверхностью матрицы с одной стороны и наружной поверхностью составной оправки с другой. Гарантированный зазор должен быть постоянным на всем протяжении формообразования. Величина гарантированного зазора установлена в резуль-

Николенко Константин Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «ОМД».

E-mail: Nik_Kin_79@mail.ru

тате моделирования (рис. 2) с последующей экспериментальной проверкой и зависит от толщины заготовки и вида применяемой смазки. Приведены экспериментальные исследования и получены следующие рекомендации: для штамповки крутоизогнутых отводов принять величину зазора, равную 1,25s, где s – толщина заготовки. Принять коэффициент трения не выше 0,09. Такой коэффициент достигается применением смазки на основе машинного масла и графита с предшествующим покрытием заготовки лаком.

Для оценки разрушения изделия выполнена обработка результатов компьютерного моделирования процесса в CAD/CAE системе ANSYS/LS-DYNA.

ПРЕДЕЛЬНАЯ СТЕПЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ ПО КРИТЕРИЮ КОЛМОГОРОВА, ПОЛУЧЕННАЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ ANSYS/LS-DYNA

Для разработки критерия предельной степени деформации и перед экспериментальной проверкой выполнено компьютерное моделирование процесса (рис. 3). В результате моделирования определены предельные возможности формообразования для материалов: титанового сплава ОТ4 и сталь 12Х18Н10Т. Разрушения материала при штамповке рассчитано по критерию Колмогорова. Данный критерий позволяет дать количественную оценку предельной степени деформации. Моделирование выполнено в программном продукте ANSYS/LS-DYNA. Результаты моделирование представлены на рис. 3.

Метод оценки штампуемости по критерию ресурса пластичности (критерий Колмогорова) заключается в следующем: в соответствии с критерием Колмогорова образование трещин происходит при условии когда интенсивность накопленной деформации равна величине критической деформации при данной схеме напряженного состояния.

Попов Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «ОМД». E-mail: igr_popov@mail.ru Маслов Валентин Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «ОМД». E-mail: avia-tek@yandex.ru Николенко Кирилл Анатольевич, аспирант кафедры «ОМД». E-mail: Nik_Kin_86@mail.ru



Рис. 2. Гофрообразование заготовок в процессе формоизменения при зазоре z=2,6 мм между рабочими частями штампа: а – геометрия оснастки;

б – гофры на боковой поверхности детали, полученные в результате компьютерного моделирования в ANSYS/LS-DYNA; в – гофры на боковой поверхности изделия, полученные в результате штамповки в инструментальном штампе



Рис. 3. Эпюры распределения интенсивности напряжений, деформаций и толщины на заключительной стадии процесса формообразования (угол гиба 90[°]) для материала 12Х18Н10Т: а – интенсивность напряжений, Па; б – интенсивность деформаций, %; в – распределение толщины, мм*10³

$$\psi = \frac{\int_{0}^{0} d\varepsilon_{i}}{\varepsilon_{\rho}^{cc}} \ge <1$$
 –критерий Колмогорова;

при $\psi \ge 1$ – происходит разрушение материала; при $\psi < 1$ – разрушения не наблюдается.

Расчет критической степени деформации выполняется для узлов по максимальному и минимальному радиусу гиба по следующей зависимости:

$$\varepsilon_{\rho}^{cc} = 2\delta_{\rho} \exp[-2.16\frac{\sigma_0}{\sigma_i}]$$
-предельная сте-

пень деформации;

Для расчета выбирались элементы в меридиональном направлении по максимальному радиусу гиба. Результаты представлены на рис. 4 в виде графиков сравнения критерия Колмогорова для двух материалов: стали 12X18H10T и сплава ОТ4 на заключительной стадии процесса формообразования (угол гиба 90 градусов).

В результате анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы: при формообразовании отвода из стали 12X18H10T разрушение не наблюдается. При этом наибольшая степень критической деформации возникает на торце передающем усилие и выходном торце по минимальному радиусу гиба. При формообразо-



Распределение критической степени деформации в меридиональном направлении (по радиусу гиба)





б – образующая по минимальному радиусу гиба – Rmin

вании отводов из сплава ОТ4 возникает разрушение на торцах по минимальному радиусу гиба.

Rmax

ВЫВОД КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Из анализа результатов компьютерного моделирования примем, разрушение терцев возникает в области по минимальному радиусу гиба. При этом деформация на торце ограничена углом в 60°. Параметром, препятствующему развитию очага деформации является коэффициент трения.

Для теоретического определения предельных параметров процесса формообразования примем следующие допущения:

Считаем, что элементы, получившие наибольшую деформацию растяжения, деформируются в условиях линейной схемы напряженного состояния. Такая схема имеет место на торце по минимальному радиусу гиба - Rmin; Максимальная тангенциальная деформация возникает на открытом торце и ограничена определенным углом (α - α_o) (рис. 5).

Деформация торцевого сечения из круга в эллипс происходит неравномерно. Считаем, что причиной неравномерности деформации является трение на поверхности контакта заготовки с инструментом (в основном верхней оправки).

Считаем, что величина деформации E_q определяется в виде относительной величины удлинения кромки, аналогично испытаниям на растяжение.

Т.к. величина перемещения относительно небольшая, можно записать следующее уравнение деформации на торце с учетом упрочнения по линейному закону:

$$\Delta l = \frac{\sigma_{TO}}{\Pi} \Big(\exp \big(f \big(\alpha - \alpha_0 \big) \big) - 1 \Big) l.$$

Левая часть уравнения представляет собой величину абсолютного удлинения кромки заготовки – Δl . Однако надо учесть, что увеличение

длины кромки заготовки по длине окружности происходит только на небольшом участке ограниченным углом α.

С другой стороны, величина абсолютного удлинения кромки заготовки может быть определена в связи с принятым допущением как разница длин окружности и эллипса. Длина эллипса определяется из условия, что после деформации круглое сечение заготовки образует плоскость, проведенную через ось детали и перпендикулярную оси превращенной в эллипс, который является зеркальным отображением эллипса первоначального сечения.

С другой стороны можно определить значение l как произведение радиуса отвода на угол α. Таким образом, подставив 1 в уравнение и разложив показатель степени в степенной ряд $\exp(f\alpha)=1+f\alpha$, можно получить уравнение для определения угла α.

Наибольшее значение α позволяет определить максимальную величину деформации Е_a. Сравнив Е_a с допустимой деформацией удлинения можно установить предельные возможности процесса.

Таки образом, условием разрушения процесса можно принять:

 $E_{\theta}^{\max} \leq \delta_{\rho}$, где δ_{ρ} относительное удлинение образца при испытаниях на растяжение.

Для определения E_{θ}^{\max} составим систему уравнений сил действующих на элементы при оправке (рис. 5).

Проекция всех сил на ось ОЛ:



Рис. 5. Схема сил, действующий при оправке: $\sigma_{ heta}$ – напряжения в тангенциальном направлении; F_1, F_2 – площадь; Tu – торец передающий усилие; *Тv* – выходной торец;

Rmax, Rmin, Rcp – максимальная, минимальная и средняя образующие соответственно

Запишем уравнения с подстановкой площадей и преобразуем:

$$\frac{\sigma_{\theta}}{R_{\theta}} = \frac{q}{s}$$
 – уравнение Лапласа, где R_{θ} – ра-

диус отвода на торце, *q* – сила натяжения по закону Лапласа, s – толщина отвода.

Проекция всех сил на ось, перпендикулярную ОЛ:

$$\sigma_{\theta}F_{1} - (\sigma_{\theta} + d\sigma_{\theta})f \pm qf = qfF_{2}.$$

Сократим уравнение с подстановкой площадей: $d\sigma_{\rho}f \pm qf = qfR_{\rho}d\alpha = 0.$

Решим совместно полученные уравнения

$$\frac{d\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}} = \pm f d\alpha \,.$$

Продифференцируем полученное уравнение: $Ln\sigma_{\theta} = \pm f\alpha + C$. (1)

Постоянную С найдем из граничных условий: при $\alpha = \alpha_0$ тангенциальное напряжение рав-

но $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^{*}$, при этом $\sigma_{\theta}^{*} = \sigma_{TO} + \Pi E_{\theta}$. С учетом того, что $E_{\theta} = 0$, получаем $\sigma_{\theta}^{*} = \sigma_{TO}$. Таким образом $C = Ln \sigma_{\theta}^* - f \alpha_0$.

Подставив значение С в уравнение (1), получим:

$$Ln \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}^{*}} = f\alpha + Ln\sigma_{\theta}^{*} - f\alpha_{0},$$
 преобразовав и

прологарифмировав, получим:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^* \exp(f(\alpha - \alpha_0)).$$

С учетом упрочения по линейному закону

$$\sigma_{TO} + \Pi E_{\theta} = \sigma_{\theta}^* \exp(f(\alpha - \alpha_0)).$$

Выразим E_{θ} :

$$E_{\theta} = \frac{\sigma_{TO}}{\Pi} \Big(\exp \Big(f \left(\alpha - \alpha_0 \right) \Big) - 1 \Big).$$
 (2)

Для определения величины E_q необходимо найти величину разницы углов $(\alpha - \alpha_0)$, определяющую область деформации.

С этой целью прологарифмируем полученное выражение (2) и разложим в степенной ряд:

$$E_{\theta cp} = \frac{\sigma_{TO}}{2\Pi} \left(\alpha - \alpha_0 \right) f, \qquad (3)$$

где $E_{\theta cp}$ – средняя деформации в тангенциальном направлении на торце.

С учетом того, что средняя логарифмическая деформация в тангенциальном направлении равна отношения длин эллипса образующей отвода к диаметру отвода (из геометрических соображений, рис. 6), получим:

$$E_{\theta cp} = Ln \left(\frac{\pi \left(1, 5\left(a+b\right) - \sqrt{ab} \right)}{2\pi R_{\theta}} \right), \qquad (4)$$

где *a*, *b* – полуоси эллипса, образованного в результате скоса торца.



Рис. 6. К определению области деформации на торце

Приравняем уравнения (3) и (4) и выразим разницу углов:

$$\left(\alpha - \alpha_{0}\right) = \frac{2\Pi}{\sigma_{TO}f} Ln\left(\frac{\pi\left(1,5\left(a+b\right) - \sqrt{ab}\right)}{2\pi R_{\theta}}\right).$$
(5)

Подставив выражение (5) в выражение (2) получим критерий для определения предельной тангенциальной деформации на торце изделия при угле гиба 900:

$$E_{\theta} = \frac{\sigma_{TO}}{\Pi} \left(\exp\left(f\left(\frac{2\Pi}{\sigma_{TO}f} Ln\left(\frac{\pi\left(1,5(a+b)-\sqrt{ab}\right)}{2\pi R_{\theta}}\right) \right) \right) - 1 \right);$$

при $E_{\theta}^{\max}=E_{\theta}\leq\delta\,p$ – разрушения не на-блюдается;

при $E_{\theta}^{\max} = E_{\theta} \ge \delta p$ – наблюдается разрешение в виде разрыва кромки.

Отметим, полученный критерий дает удовлетворительные результаты при формообразовании отводов на угол 900. Для оценки штампуемости с меньшим углом гиба необходим анализ результатов компьютерного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментальной проверки полученных зависимостей определения предельных параметров процесса выполнено формообразование серии заготовок с низкими пластическими характеристиками (материал ОТ4).

При этом, как показал компьютерное моделирование и теоретический расчет, разрушение наблюдается на выходном торце по минимальному радиусу гиба (рис. 7).

выводы

1. Выполнено моделирования процесса штамповки крутоизогнутых отводов в программном продукте ANSYS/LS-DYNA. В результате компьютерного моделирования подобраны технологические параметры, позволяющие получать изделия без гофр на боковой поверхности.

2. Построены графики предельной степени деформации по критерию Колмогорова для материалов с различными пластическими характеристиками – титановый сплав ОТ4 и нержавеющая сталь 12X18H10T. Установлено, отводы из титанового сплава разрушаются на выходном торце по минимальному радиусу гиба. При штамповке отводов из стали 12X18H10T разрушения не наблюдается.

3. Выведена аналитическая зависимость, позволяющая дать оценку критической степени деформации при штамповке отводов на угол 90⁰.

4. Выполнена экспериментальная проверка подтверждающая достоверность полученных результатов исследования.



Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований: а – штамповая оснастка; б – изделие без разрушения и гофр на боковой поверхности; в – разрыв заготовки на выходном торце по минимальному радиусу гиба

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Попов И.П., Маслов В.Д., Николенко К.А., Брусин В.Д., Михеев В.А., Хритин А.А. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов: Пат. RU 2294807 C1 (РФ). 2007.
- Маслов В.Д., Попов И.П., Николенко К.А., Попов А.Д. Устройство для формообразования крутоизогнутых отводов: Пат. RU 72649 U1 (РФ). 2008.
- 3. Попов И.П., Маслов В.Д., Николенко К.А. Формообразование тонкостенных крутоизогнутых отво-

дов в жестких инструментальных штампах // Заготовительное производство в машиностроении. 2007. № 1. С. 23-26.

- Маслов В.Д., Николенко К.А. Моделирование процессов листовой штамповки в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA; Учебное пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 80 с.
- LS-DYNA Конечно-элементный анализ [Электронный ресурс]. URL: http://lsdyna.ru (дата обращения 09.04. 2017)

DETERMINATION OF THE LIMITING PARAMETERS OF PUNCHING ELEMENTS OF PIPELINES FROM TITANIUM ALLOY OT4 AND STEEL 12X18H10T

© 2017 I.P. Popov, V.D. Maslov, Kir. A. Nikolenko, Kon. A. Nikolenko

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The results of processing computer simulation and determining the limiting degree of deformation by the Kolmogorov criterion are presented. The derivation of the dependence for the evaluation of the destruction of low-plastic materials at the end is made at an angle of 90° bending. *Keywords*: Steeply curved elbow computer model ANSYS/JS-DYNA corrugation criterion of destruction

Keywords: Steeply curved elbow, computer model, ANSYS/LS-DYNA, corrugation, criterion of destruction, stress, strain, thickness, experimental studies.

Igor Popov, Professor of Technics, Associate Professor at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: igr_popov@mail.ru Valentin Maslov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: avia-tek@yandex.ru Kirill Nikolenko, Graduate Student at the Plastic Working of Metal Department. E-mail: Nik_Kin_86@mail.ru Konstantin Nikolenko, Candidate of Technics, Associate

Professor at the Plastic Working of Metal Department.