

**ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ХОЛОДНОМ  
ВЫДАВЛИВАНИИ ВТУЛОК С ФЛАНЦЕМ****Алиев И. С., Алиева Л. И., Мартынов С. В., Ткаченко Н. Ю.**

С помощью экспериментально-аналитического метода координатных делительных сеток определены компоненты тензора деформаций и напряжений, компоненты девиатора напряжений и гидростатическое давление при осесимметричном выдавливании внутреннего фланца из трубной заготовки. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что картина распределения напряжений соответствует распределению деформаций. Наиболее проработанной является область в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки фланца. Гидростатическое давление имеет отрицательное значение по всему очагу деформации, что способствует повышению пластичности и снижает вероятность разрушения металла. Наиболее вероятной с точки зрения разрушения является зона, которая простирается в направлении от внутренней поверхности фланца к наружной поверхности стенки заготовки у нижнего ее торца, а также зона у переходной кромки оправки.

За допомогою експериментально-аналітичного методу координатних ділильних сіток визначено компоненти тензора деформацій і напружень, компоненти девіатора напружень і гідростатичний тиск при осесиметричному видавлюванні внутрішнього фланця із трубної заготовки. Аналіз напружено-деформованого стану показав, що картина розподілу напружень відповідає розподілу деформацій. Найбільш проробленої є область у зоні нижнього торця фланця біля зовнішньої стінки фланця. Гідростатичний тиск має від'ємне значення по всьому осередку деформації, що сприяє підвищенню пластичності і знижує ймовірність руйнування металу. Найбільш вірогідною з точки зору руйнування є зона, яка простягається у напрямку від внутрішньої поверхні фланця до зовнішньої поверхні стінки заготовки у нижнього її торця, а також зона у перехідній кромки оправки.

With the help of experimental and analytical method of the coordinate dividing grids the components of the stress and strain, the components of deviatoric stress and hydrostatic pressure for axisymmetric extrusion of the inner flange of the tube blank is determined. Analysis of the stress-strain state showed that the pattern of stress distribution corresponds to distribution of strains. The most worked out is an area in the zone of the lower end of the flange at the outer wall of the flange. Hydrostatic pressure has a negative value around the center of deformation, which increases ductility and reduces the probability of failure of the metal. From the standpoint of fracture the zone stretching in the direction from the inner surface of the flange to the outer wall surface of workpiece at the lower end of it, as well as the transition zone at the edge of the mandrel are most likely.

Алиев И. С. д-р. техн. наук, проф., зав кафедрой ОМД ДГМА  
[omd@dgma.donetsk.ua](mailto:omd@dgma.donetsk.ua)

Алиева Л. И. канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ОМД ДГМА

Мартынов С. В. ассистент кафедры ОМД ДГМА

Ткаченко Н. Ю. студент ДГМА

УДК 621.7

Алиев И. С., Алиева Л. И., Мартынов С. В., Ткаченко Н. Ю.

### ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ВТУЛОК С ФЛАНЦЕМ

В приборостроении получили применения детали типа втулок с внутренним фланцем. Это всевозможные корпусные детали, крышки, втулки и т. д. Одним из способов получения подобных деталей является точная объемная штамповка холодным выдавливанием. Данный способ имеет конкурентные преимущества в сравнении с традиционными методами (обработка резанием, литье, горячая штамповка), которые выражаются в увеличении коэффициента использования металла (до 90 %), деформационном упрочнении, качественной поверхности детали и т. д.

При исследовании новых технологических схем, таких как радиальное выдавливание внутренних фланцев из трубной заготовки, важно знание распределения деформаций и напряжений по объему детали, а также положение, форма и размеры очага деформации по ходу процесса [1]. Это дает возможность оценки формоизменения заготовки и определения вероятных зон разрушения заготовки, т. е. исчерпания ресурса пластичности. Это позволяет прогнозировать механические свойства штампованных деталей и оптимизировать геометрию инструмента для уменьшения градиента деформации, т. е. снижения вероятности разрушения детали в процессе эксплуатации. В последнее время развиваются критерии разрушения, в которых накладываются ограничения на деформации [2, 3] (критерии Огородникова В. А., Колмогорова В. Л., Ильюшина А. А. и др.). Например, в работе [2] для формулирования условия разрушения Г. А. Смирновым-Аляевым предложен критерий:

$$\Psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)},$$

где  $\Psi$  – использованный ресурс пластичности, который при деформировании без разрушения меньше единицы. При разрушении  $\Psi = 1$ ;

$e_u = \int_0^t \varepsilon d\tau$  – степень деформации;

$e_p(\eta)$  – диаграмма пластичности.

Показатель  $\eta$  введен в практику оценки пластичности С. И. Губкиным, В. А. Бабичковым [2] и впервые использован для построения диаграмм пластичности Г. А. Смирновым-Аляевым. Диаграммы пластичности это экспериментальные кривые, которые отображают зависимость граничной деформации  $e_p$  от показателя жесткости напряженного состояния  $\eta$  (показатель Г. А. Смирнова-Аляева):

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u},$$

где  $\sigma_0$  – гидростатическое (среднее) напряжение;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – компоненты тензора главных напряжений;

$\sigma_u$  – интенсивность напряжений.

Однако трудоемкость вычисления компонент тензора главных напряжений значительно усложняло расчет использованного ресурса пластичности. С развитием прикладного математического программного обеспечения расчет таких задач значительно упрощается, что открывает широкие возможности в анализе технологической деформируемости штамповок.

Цель данного исследования – определение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при центростремительном выдавливании фланца из трубчатой заготовки и оценки ресурса исчерпания пластичности.

Для определения деформированного состояния в данной работе использован экспериментально-аналитический метод координатных делительных сеток, который позволяет качественно и количественно оценить распределение деформаций и напряжений в объеме заготовки [4]. Заготовка имела следующие размеры: внутренний и наружный диаметр  $28,2 \times 36$  мм, высота 21,3 мм. Радиус закругления переходной кромки оправки 1,8 мм, высота зазора между верхней и нижней втулкой разборной оправки 3,2 мм (высота фланца). Сетка была нанесена строганием и имела базу 2 мм. Образцы при деформации не спаивались, так как раскрытие полувтулок при центростремительном выдавливании не происходит. Экспериментальная оснастка состояла из контейнера 1 (рис. 1, а), противополоуансона 2, подкладного кольца 3, разборной оправки 4, матрицы 5, пуансона 6, подкладной плиты 7. Деформирование происходило на испытательной машине МС-500. После каждого этапа деформации заготовки измерялись и сканировались. Координаты узлов пересечения делительной сетки измерялись с помощью программы Grafula 3. Далее по методике И. П. Ренне [4] в пакете MathCAD рассчитывались компоненты тензора деформаций и интенсивность деформаций.

Решение краевых задач по определению напряженного состояния предполагает монотонность функции. Если деформация немонотонна, а в данном случае можно говорить что она квазимоноотонна только в зоне над нижним торцом фланца, то это приводит к погрешностям расчета. В качестве граничного условия принимаем значение радиального напряжения равное нулю  $\sigma_r = 0$  на свободной от нагрузок внутренней поверхности фланца. Направление расчета (см. рис. 2 по  $\sigma_r$ ) слева направо по горизонтальному ряду ячеек. Переход на ряд выше происходит по предпоследней, третьей, ячейке ряда. Крайние значения напряжений первого ряда не рассчитаны, так как при расчете, по правилу трапеций, требуются законтурные значения девиатора сдвиговых напряжений. Попытка получения последних экстраполяцией полиномом n-ой степени не дала положительных результатов ввиду не монотонности функции. В результате расчета в пакете MathCad получали матрицы значений напряжений, контурные графики распределения компонент напряжений в цвете, а также график, имитирующий координатную сетку. Далее график с координатной сеткой накладывался на графики распределения деформаций и напряжений, экстраполированные области обрезались в пакете CorelDRAW и записывали значения компонент НДС в ячейках.



Рис. 1. Штамповая оснастка и картины поэтапного изменения делительной сетки

При известном тензоре деформированного состояния, компоненты девиатора тензора напряженного состояния вычисляются по соотношениям деформационной теории пластичности упрочняющегося материала [5]. Компоненты девиатора напряжений:

$$S_r = \sigma_r - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_r; \quad S_\theta = \sigma_\theta - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_\theta; \quad S_z = \sigma_z - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_z. \quad (1)$$

При сложном нагружении девиатор касательных напряжений следует определять из соотношений теории течения:

$$S_{\tau_{rz}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_z. \quad (2)$$

Для определения гидростатического давления интегрируем одно из уравнений равновесия для осесимметричной деформации. Согласно первому из этих уравнений:

$$(\sigma_r)_B = (\sigma_r)_A \pm \int_A^B \left[ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{S_r - S_\theta}{r} \right] dr. \quad (3)$$

По второму уравнению:

$$(\sigma_z)_D = (\sigma_z)_C \pm \int_C^D \left[ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right] dz. \quad (4)$$

Определив одно из напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$ , вычитаем из него соответствующую компоненту девиатора напряжений (1) и находим гидростатическое давление  $\sigma_0$ . Прибавив его к остальным компонентам девиатора, находим соответствующие им напряжения.

Если пластическая зона имеет свободный от нагружения контур, то окружное напряжение у этого контура равно:

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot (\varepsilon_\theta - \varepsilon_n), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_n$  – главная деформация в направлении нормали к контуру.

Следовательно, гидростатическое давление и остальные напряжения можно определить по формулам:

$$\sigma_0 = \sigma_\theta - S_\theta; \quad \sigma_r = \sigma_0 + S_r; \quad \sigma_z = \sigma_0 + S_z. \quad (6)$$

Эти напряжения могут быть использованы как граничные условия.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния были использованы для оценки значений использованного ресурса пластичности  $\Psi$ , который определяли по формуле (7) по критерию [6, 7]:

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (7)$$

где  $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,1 \cdot e^{(0,42 \cdot \mu_\sigma - 0,51 \cdot \eta)}$  – поверхность граничных деформаций для АД 31 [8];

$\mu_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$  – параметра Надаи-Лоде.

Главные напряжения определяются из решения характеристического уравнения, которое в общем случае является кубическим:

$$\sigma^3 - I_1 \cdot \sigma^2 + I_2 \cdot \sigma - I_3 = 0, \tag{8}$$

где  $\sigma$  – искомые главные напряжения;  $I_1, I_2, I_3$  – первый, второй и третий варианты тензора напряжений (компоненты тензора напряжений, см. рис. 2).

Таблица 1

Результаты радиального выдавливания АД 31 радиус закругления оправки 1,8 мм, высота фланца 3,2 мм, заготовка 28,2 × 36 мм

№	Высота (мм), радиус фланца R <sub>k</sub>	Ход, мм	Усилие, кН
1	21,3 (начальное положение), R <sub>k</sub> = 28,2 /2		
2	17,7, R <sub>k</sub> = 19,4/2	3,6	130
3	15,5, R <sub>k</sub> = 14,2/2	2,2	165

Наиболее деформированной областью заготовки является область в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки (см. рис. 2 по  $\varepsilon_r$ ). Значения логарифмической деформации немонокотно убывают в направлении внутренней стенки фланца, причем такой характер наблюдается до середины высоты фланца, по наружной стенке, в направлении от нижнего торца фланца. Выше середины фланца характер изменения деформации меняется в виду того, что ячейки, примыкающие к наружной стенке, становятся менее проработанными, а ячейки, примыкающие к переходной кромке оправки, более продеформированы чем последние. Максимальные значения деформации по  $\varepsilon_r$  также находятся в зоне, примыкающей к нижнему торцу фланца.

Очаг деформации ограничивается параболической кривой, проходящей от верхней точки радиуса закругления переходной кромки оправки до середины высоты фланца у наружной стенки. Значения меняют свой знак в ячейках у переходной кромки, что свидетельствует о сжатии металла в зоне разворота металла у оправки. Значения деформации по  $\varepsilon_z$  имеют отрицательные значения, максимальные значения по модулю достигаются в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки. Наличие положительных значений деформаций в ячейках, примыкающих к внутренней стенке фланца, объясняется несовершенством методики расчета в ячейках, которые подвергаются повороту, а также погрешностью расчета связанной с большой базой делительной сетки. Уменьшение размеров ячеек в этой зоне позволит повысить точность расчетов и нивелировать влияние поворота ячейки. Зона максимальных значений окружной деформации  $\varepsilon_\theta$  сосредотачивается у внутренней стенки фланца. А зона максимальных сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{rz}$ , описывается параболическими кривыми, отсекающих сектор от переходной кромки, прилегающей к оправке, до ячеек, сосредоточенных у наружной стенки в зоне нижнего торца фланца.

Зависимость напряжения от деформации, полученная при испытании на осадку цилиндрического образца, описывается уравнением  $\sigma_s = 191,55 \cdot \varepsilon_i^{0,202}$ . Картина распределения интенсивности напряжений аналогична распределению интенсивности деформации. Максимальные значения достигают 210,3 МПа, а минимальные 111,7 МПа. Гидростатическое

давление имеет отрицательное значение во всех ячейках сечения, что говорит о благоприятной схеме напряженного состояния, способствующей увеличению пластичности материала. Максимальные сдвиговые напряжения  $\sigma_{rz}$  сосредотачиваются в зоне переходной кромки оправки, а максимальные радиальные напряжения у наружной стенки в зоне нижнего торца фланца. Зона максимальных высотных напряжений  $\sigma_z$  сосредотачивается, также, у наружной стенки и по высоте равна высоте фланца. Максимальные окружные напряжения  $\sigma_\theta$  сосредотачиваются в зоне нижнего торца фланца и у наружной стенки заготовки.

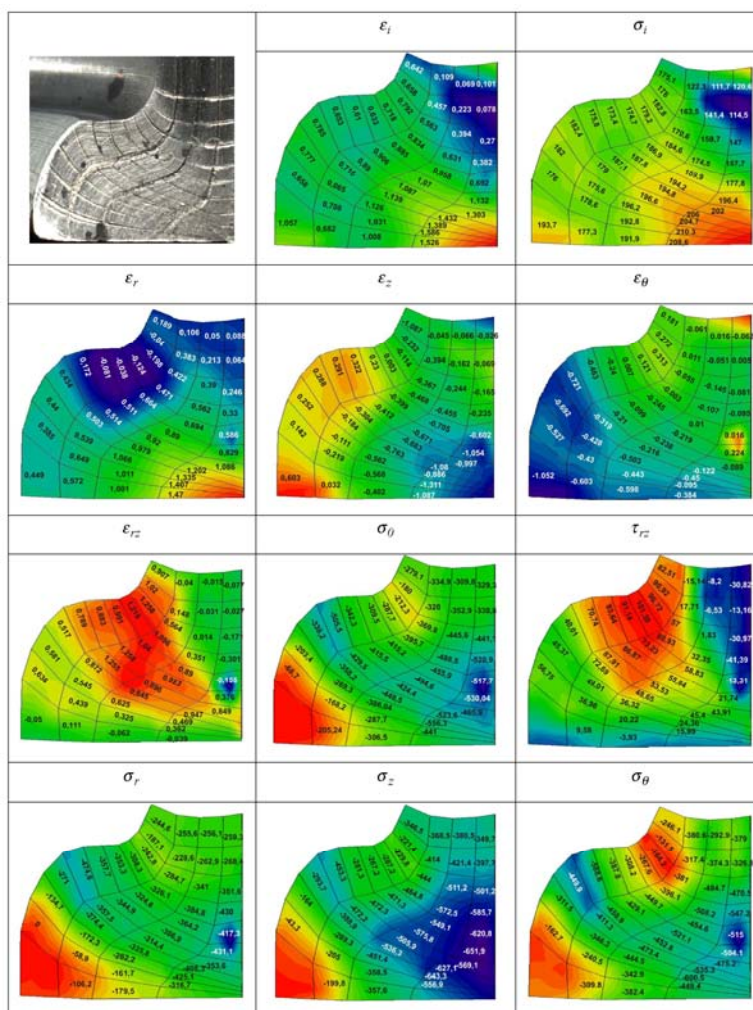


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при радиальном выдавливании фланцев

Компоненты тензора главных напряжений, полученные решением характеристического уравнения (8), параметр Надаи-Лоде, показатель напряженного состояния представлены (рис. 3). Так как поверхность граничных деформаций аппроксимировалась при показателе напряженного состояния  $\eta \in -2..+1$ , рассчитать количественно исчерпание ресурса пластичности не представляется возможным (большие отрицательные значения  $\eta$ ). Однако, если предположить, что в области больших отрицательных значений показателя жесткости  $\eta$ , характер влияния  $\eta$  на поверхность граничных деформаций такой же как и в диапазоне  $\eta \in -2..+1$ , то можно качественно оценить распределения критерия  $\Psi$  по сечению очага деформации, используя то же уравнение поверхности граничных деформаций  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ . То есть можно определить зоны очага деформации, в которых  $\Psi$  исчерпан максимально. Таким

образом, наиболее вероятной с точки зрения разрушения (рис. 3), является зона, которая простирается в направлении уменьшения  $\Psi$  от внутренней поверхности фланца к наружной поверхности стенки заготовки у нижнего ее торца, а также зона у переходной кромки оправки.

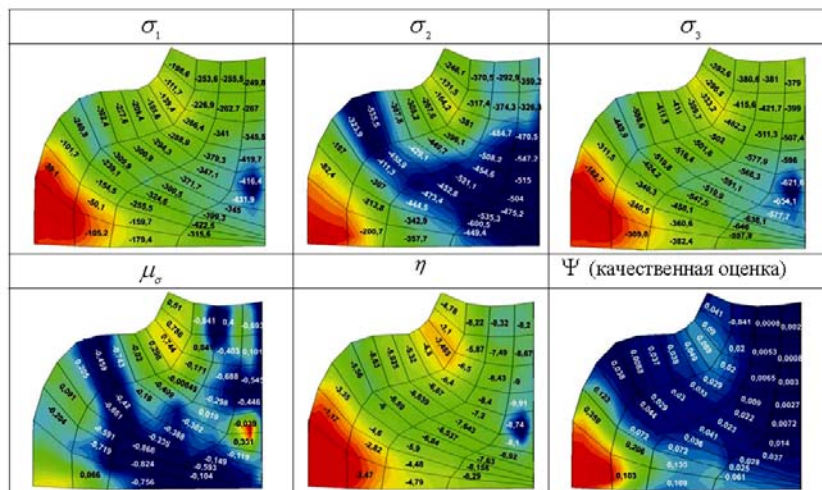


Рис. 3. Напряженное состояние, показатели напряженного состояния и качественная оценка исчерпания ресурса пластичности в очаге деформации при радиальном выдавливании фланцев

### ВЫВОДЫ

С помощью экспериментально-аналитического метода координатных делительных секторов определены компоненты тензора деформаций и напряжений, компоненты девиатора напряжений и гидростатическое давление при осесимметричном выдавливании внутреннего фланца из трубной заготовки. Анализ НДС показал, что картина распределения напряжений соответствует распределению деформаций. Наиболее проработанной является область в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки фланца. Гидростатическое давление имеет отрицательное значение по всему очагу деформации, что способствует повышению пластичности и снижает вероятность разрушения металла. Наиболее вероятной с точки зрения разрушения является зона, которая простирается в направлении от внутренней поверхности фланца к наружной поверхности стенки заготовки у нижнего ее торца, а также зона у переходной кромки оправки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиева Л. И. *Формоизменение при радиальном выдавливании фланцев [Электронный ресурс]* / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Я. Г. Жбанков // *Вісник ДДМА*. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1Е (6). – С. 135–139. – Режим доступу до журн.: <http://www.dgma.donetsk.ua/publish/vesnik/article/06ALIFRE.pdf>.
2. Огородников В. А. *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)* / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. Монография. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
3. Огородников В. А. *Диаграммы пластичности и особенности их построения* / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Музычук // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 251–255.
4. Рене И. П. *Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением* / И. П. Рене. – Тула : ТПИ, 1979. – 96 с.
5. Дель Г. Д. *Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости* / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200с
6. Сивак И. О. *Поверхность предельной пластичности* / И. О. Сивак // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДГМА, 1999. – С. 9–15.
7. Сивак И. О. *Пластичность металлов при объёмном напряжённом состоянии* / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбовская // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 73–76.
8. Кирица І. Ю. *Удосконалення процесів холодного пластичного деформування при отриманні вісесиметричних заготовок з глухим отвором* : дис. ...канд. техн. наук : 05.03.05 / Кирица Інна Юріївна. – Вінниця, 2007. – 220 с.