

УДК 621.7.011.001

Огородников В. А.
Архипова Т. Ф.
Деревенько И. А.

ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

После различных операций обработки металлов давлением формируется технологическое наследие – остаточные напряжения, упрочнение, градиент деформаций, остаточная пластичность и другие факторы. Указанные факторы влияют в дальнейшем на эксплуатационные качества изделий, что и предопределяет задачу создания методик количественной оценки указанных факторов. Большинство из перечисленных факторов на сегодняшний день достаточно изучены [1], однако некоторые из них, например, оценка пластичности предварительно деформированной заготовки является сложной и недостаточно изученной проблемой.

Вопросам оценки пластичности деформированного металла особое внимание уделено в работах зарубежных ученых, занимающихся проблемами разрушения элементов конструкций транспортных средств. Немецкая фирма «Matfem» (Германия, Мюнхен) разрабатывает программное обеспечение аварийного разрушения транспортного средства (компьютерное моделирование аварий) с целью прогнозирования ожидаемых повреждений, при известной скорости движения автотранспортного средства перед ударом. В данном случае необходимо знать пластичность деформированных в результате штамповки листовых заготовок. Некоторые результаты этих исследований опубликованы в работах [2–4].

Целью настоящей работы является разработка методики оценки пластичности предварительно деформированного металла. Мерой пластичности в момент разрушения материала заготовки в области конечных деформаций примем накопленную на всех этапах деформирования интенсивность деформаций (параметр Удквиста), называемую предельной деформацией e_p :

$$e_p = \int_0^{\tau_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_u$ – интенсивность скоростей деформации.

Пластичность металлов зависит от многих факторов, среди которых, кроме природы материала, основными являются термомеханические параметры процесса: температура, скорость деформации, вид напряженного состояния, история деформирования, градиент деформации и др. Зависимость пластичности от вида напряженного состояния при простом деформировании и фиксированных температурно-скоростных условиях является его механической характеристикой. Для её построения проводят испытание материала при различных напряженных состояниях в условиях простого нагружения, когда компоненты тензора напряжения изменяются пропорционально одному параметру.

Напряженное состояние будем характеризовать показателями напряжённого состояния. Показатель напряженного состояния по Г. А. Смирнову-Аляеву [5]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1}, \quad (2)$$

где $I_1(T_\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $I_2(D_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений или интенсивность напряжений:

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}. \quad (3)$$

Параметр η удобен при использовании диаграмм пластичности в координатах $e_p = f(\eta)$, и соответственно равен $\eta = 1$ (одноосное растяжение, $\eta = -1$ – одноосное сжатие, $\eta = 2$ – двухосное растяжение, $\eta = -2$ – двухосное сжатие, $\eta = 0$ – сдвиг).

Показатель напряженного состояния, отражающий влияние третьего инварианта тензора либо девиатора напряжений по В. А. Огородникову [6]:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u} \quad (4)$$

или

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(D_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{S_1S_2S_3}}{\sigma_u}, \quad (5)$$

где $S_1 = \sigma_1 - \sigma$, $S_2 = \sigma_2 - \sigma$, $S_3 = \sigma_3 - \sigma$ – главные девиаторы тензора напряжений, $\sigma_u = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – среднее напряжение.

Перечисленные показатели напряженного состояния нашли широкое применение при оценке использованного ресурса пластичности заготовок, деформируемых в условиях объёмного напряженного состояния. В этих случаях, зависимость предельной деформации от показателей напряженного состояния, называется диаграммой пластичности. При этом она может быть представлена двумерной $e_p(\eta)$ или трехмерной $e_p(\eta, \chi)$ диаграммой. В случае изучения технологических процессов обработки давлением листовых материалов разрушение может сопровождаться отрывом либо срезом, иногда наблюдается смешанные виды разрушения.

При моделировании разрушения отрывом полагается, что при постоянных скоростях деформации и температуре диаграмма пластичности представима в виде единой для различных напряженных состояний зависимостью $e_p(\beta)$ [4], где

$$\beta = \frac{1 - S\eta}{\gamma}, \quad (6)$$

где

$$\gamma = \frac{\sigma_1}{\sigma_u}. \quad (7)$$

Здесь σ_u – см. (2), σ_1 – наибольшее из главных напряжений, S – параметр материала.

В случае разрушения срезом диаграмма пластичности представляется функцией $e_p(\theta)$, где

$$\theta = \frac{1 - k\eta}{\omega}, \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_u}. \quad (9)$$

Здесь τ_{\max} – максимальное касательное напряжение, k – параметр материала.

Таким образом, зависимости $e_p(\eta, \chi, \theta, \beta)$ – диаграммы пластичности, отражающие зависимость предельной деформации от показателей напряженного состояния. Диаграммы получают экспериментально испытанием материалов в условиях линейного либо плоского напряженных состояний (растяжение, сжатие, кручение (сдвиг)) и других видов испытаний.

Если известна экспериментально построенная диаграмма пластичности, можно ли построить её после предварительной пластической деформации при любом виде напряженного состояния? Это и составит в дальнейшем решение поставленной выше задачи. Её решение основано на тензорном описании накопления повреждений [7].

Если известна начальная диаграмма пластичности компоненты тензора повреждений ψ_x, ψ_{xy}, \dots и накопленная деформация в конце пластического деформирования, определенная в системе координат X, Y, Z , то можно рассчитать диаграмму пластичности деформированного металла. Пусть требуется определить пластичность этого материала e'_p при напряженном состоянии, которому соответствуют показатели напряженного состояния η'_1, η'_2 и тензор $\beta'_x, \beta'_{xy}, \dots$. Тогда приращения компонент тензора повреждений при дополнительном деформировании до разрушения будут равны:

$$\Delta \psi_x = \beta'_x \left[\phi(\bar{e}_0 + e'_0, \eta'_1, \eta'_2) - \phi(\bar{e}_0, \eta'_1, \eta'_2) \right] \quad (10)$$

$$\Delta \psi_{xy} = \beta'_{xy} \left[\phi(\bar{e}_0 + e'_0, \eta'_1, \eta'_2) - \phi(\bar{e}_0, \eta'_1, \eta'_2) \right] \dots$$

Условие разрушения запишем в виде

$$(\psi_x + \Delta\psi_x)^2 + (\psi_{xy} + \Delta\psi_{xy})^2 + (\psi_{yx} + \Delta\psi_{yx})^2 + \dots = 1. \quad (11)$$

Или

$$\Delta\psi_x^2 + \Delta\psi_{xy}^2 + \Delta\psi_{yx}^2 + \dots + 2(\psi_x\Delta\psi_x + \psi_{xy}\Delta\psi_{xy} + \psi_{yx} + \dots) + \psi_0^2 = 1, \quad (12)$$

в формуле (12)

$$\psi_0^2 = \psi_x^2 + \psi_{xy}^2 + \psi_{yx}^2 + \dots \quad (13)$$

Из равенств (12), (10) получаем квадратное уравнение, из которого находим:

$$\varphi(\bar{e}_0 + e'_0, \eta'_1, \eta'_2) = \varphi(\bar{e}_0, \eta'_1, \eta'_2) - D + \sqrt{1 + D^2 - \psi_0^2}, \quad (14)$$

где

$$D = \beta'_x\psi_x + \beta'_{xy}\psi_{xy} + \beta'_{yx}\psi_{yx} + \dots \quad (15)$$

После аппроксимации, получим пластичность деформированного металла:

$$e'_p = e_p \left[-\frac{\bar{e}_0}{e_p} - \frac{1-a}{2a} + \sqrt{\left(\frac{\bar{e}_0}{e_p} + \frac{1-a}{2a}\right)^2 - \frac{D}{a} + \frac{1}{a}\sqrt{1+a^2-\psi_0^2}} \right] \quad (16)$$

Здесь e_p – пластичность недеформированного металла при напряженном состоянии с $\eta_1 = \eta'_1$, $\eta_2 = \eta'_2$. Параметр a – коэффициент аппроксимации, приведенный в критерии [7].

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} (1 - a + 2ae_u^*/e_p) \beta_{ij} de_u^*/e_p. \quad (17)$$

Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [7], $a = 0,5$.

Таким образом, с помощью (16) можно рассчитать предельную деформацию деформированного металла при любом показателе напряженного состояния.

С помощью феноменологических теорий деформируемости, в которых накопление повреждений описывается тензорными моделями, оказывается возможным прогнозировать технологическое наследие материала в виде остаточной пластичности полученной детали. Если в процессе обработки компоненты тензора повреждений в данной точке заготовки составляют C , то при последующем испытании на растяжение в направлении оси x_1 в данной точке компоненты тензора меняются на величину $\Delta\psi_{ij}$. Если условие разрушения при таком растяжении записать в виде:

$$(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij})(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij}) = 1, \quad (18)$$

то из него можно получить выражение для предельной дополнительной деформации растяжения в направлении оси x_1 [9]:

$$\frac{e_{p11}}{e_p} = -\frac{1}{2} - \frac{e_i^*}{e_p} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{e_i^*}{e_p}\right)^2 - \sqrt{6}\psi_{11} + \sqrt{6}\psi_{11}^2 + 4(1 - \psi_{ij}\psi_{ji})}. \quad (19)$$

где e_i^* – накопленная деформация при формообразовании заготовки; $e_p = e_p$ ($\eta=1$) – пластичность металла при $\eta=1$; e_{p11} – остаточная пластичность при растяжении в направлении 11.

Так как ψ_{11} зависит от направления x_1 , остаточная пластичность e_{p11} также оказывается зависящей от направления. Таким образом, по (19) можно оценить анизотропию пластичности в выбранной зоне отвода, полученного методом холодного пластического деформирования.

В качестве примера, иллюстрирующего практическую значимость полученных результатов, можно привести оценку пластичности крутоизогнутых отводов, полученных методом холодного пластического деформирования по комбинированной схеме, которая включает деформирующее протягивание заневоленной заготовки. При этом заготовка в виде трубы подвергается пластическому изгибу с последующей потерей устойчивости пластического

деформирования. В работе [6] представлена формула, полученная на основе тензорного представления о накоплении повреждений, позволяющих оценить остаточную пластичность готового отвода. Формула имеет вид:

$$\frac{e_p}{\delta_p} = \frac{D_1 b e_i^*}{200 \delta_p} + \frac{D_1 b}{100} \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{100 e_i^*}{D_1 b \delta_p}\right)^2 + \sqrt{2} \left[\psi_s - \psi_\theta + \sqrt{(\psi_s - \psi_\theta)^2 + (1 - \psi_{ij} \psi_{ji})} \right]}, \quad (20)$$

где δ_p – относительное удлинение при разрыве, $b = \frac{C_1}{B_1}$ ($C_1 = 1,03$, $B_1 = 0,55$ для стали 20; $C_1 = 1,08$, $B_1 = 0,67$ для стали X18H9T) $D_1 = 0,66$ для стали 20; $D_1 = 0,73$ для стали X18H9T.

$$\begin{aligned} \psi_\alpha = \psi_\theta &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} + \left(\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} \right)^2 \right]; \\ \psi_s &= -(\psi_\alpha - \psi_\theta) = -2\psi_\alpha; \\ \psi_{ij} \psi_{ji} &= \frac{1}{4} \left[\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} + \left(\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} \right)^2 \right]^2. \end{aligned} \quad (21)$$

В указанной работе проведена экспериментальная проверка результатов расчета остаточной пластичности заготовок, предварительно деформированных до получения готовых изделий. С этой целью из отводов $90^\circ 57 \times 4$, $90^\circ 89 \times 4,5$, изготовленных из стали 20 ($\delta_p = 30\%$), из наружной зоны вырезались плоские образцы для испытания на растяжение в продольном и окружном направлении крутоизогнутого отвода. Растяжение этих образцов показало, что их остаточные удлинения в продольном и окружном направлениях примерно одинаковы. В табл. 1 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений остаточной пластичности.

Таблица 1

Сравнение расчетных и экспериментальных значений остаточной пластичности

Типоразмер отвода	Расчет				Эксперимент		Максимальное расхождение %
	ψ	e_{PS}	$e_{Pразд}$	$e_{Pa} = e_{P\theta}$	e_{Pa}	$e_{P\theta}$	
$90^\circ 57 \times 4$	0,35	0,58	0,27	0,43	0,41	0,37	9,3
$90^\circ 89 \times 4,5$	0,4	0,59	0,25	0,41	0,38	0,35	14,6

Одним из важнейших показателей качества отводов, получаемых методом холодного пластического деформирования, является их остаточная пластичность при рабочих нагрузках (особенно при циклических нагрузках давлением при повышенных температурах). Эта пластичность оценивается косвенно по результатам на растяжение образцов, вырезанных из отводов в разных направлениях.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика оценки пластичности предварительно деформированного металла, основанная на тензорном описании накопления повреждений в условиях холодного пластического деформирования. Методика позволяет при известных механических характеристиках, а также при известных диаграммах пластичности оценивать пластичность предварительно деформированных заготовок при любом виде напряженного состояния.

2. Методика апробирована на примере изготовления крутоизогнутых отводов методом протяжки предварительно заневоленной трубы. Показана удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын П. И. *Технологическая наследственность в машиностроении* / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.

2. Dell H. *Continuos Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes*, SAE / Dell H., Gese H., Kepler L., Werner H., Hooputra H. – Paper 2001 – 01 - 1131, *New Sheet Steel Produkts and Steet M.etal Stamping (SP – 1614)*, SAE 2001 world Congress, Michigan, march 5–8, 2001. – P.113–122.
3. Дель Г. Д. Модель разрушения пластичних материалов / Г. Д. Дель // Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз // Збірник тез доповідей міжн. нак.-техн. конф., м. Вінниця, 30 травня–2 червня 2011 р. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 28–29.
4. Dell H. *Comprehensive Approach for the Prediction of Sheet Metal Failure* / H. Dell, H. Gese, G. Obezhover // *Materials Processing and Design, Modeling, Simulation and Applications. – Part 1. – Numiform 07. American Institute of Physics. – 2007. – P. 165–170.*
5. Смирнов-Аляев Г. А. *Сопротивление материалов пластическому деформированию* / Смирнов-Аляев Г. А. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
6. Огородников В. А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. – Головне вид-во «Вища школа», 1983. – 175 с.
7. Дель Г. Д. *Пластичность деформированного материала* / Г. Д. Дель // *Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.*
8. Цеханов Ю. А. *Механика деформирующего протягивания как научная основа оценки качества деталей и работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями* / – Дис.... докт. техн. наук: 05.02.08. – Воронеж, 1993. – 385 с.
9. *Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы : монография* / Розенберг О. А., Огородников В. А., Грушко А. В. [и др.] – Винниця : Універсум – Вінниця, 2004. – 140 с.

REFERENCES

1. Yascheritsyin P. I. *Tehnologicheskoya nasledstvennost v mashinostroenii.* / P. I. Yascheritsyin, E. V Ryzhov, V. I Averchenkov – Minsk. : Nauka i tehnika, 1977. – 256 s.
2. Dell, H.; Gese, H.; Kepler, L.; Werner, H. and Hooputra, H.: *Continuos Failure Prediction Model for Non-linear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes*, SAE – Paper 2001 – 01 - 1131, *New Sheet Steel Produkts and Steet M.etal Stamping (SP – 1614)*, SAE 2001 world Congress, Michigan, march 5 - 8, 2001. – P. 113–122.
3. Del G. D. *Model razrusheniya plastichnih materialov* / G. D. Del // *TeoretichnI I prikladnI zadachI obrobki metallIv tiskom ta avtotehnIchnih ekspertiz. ZbIrnik tez dopovIdey mlzhn. nak.-tehn. CONF., m. VInnitsya, 30 travnya-2 chervnya 2011r. – VInnitsya: VNTU, 2011. – S. 28-29.*
4. Dell H. *Comprehensive Approach for the Prediction of Sheet Metal Failure* / H. Dell, H. Gese, G. Obezhover // *Materials Processing and Design, Modeling, Simulation and Applications. Part 1. Numiform 07. American Institute of Physics. – 2007. – P. 165-170*
5. Smirnov-Alyaev G. A. *Soprotivlenie materialov plasticheskomu defomirovaniyu.* / Smirnov-Alyaev G. A. – L. : Mashinostroenie, 1978. – 368 s.
6. Ogorodnikov V. A. *Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davlenim* / V. A. Ogorodnikov. – Golovne vid-vo «Vischa shkola», 1983. – 175 s.
7. Del G. D. *Plastichnost deformirovannogo materiala* / G. D. Del // *Fizika i tehnika vyisokih davleniy. – 1983. – № 11. – S. 28-32.*
8. Tsehanov Yu. A. *Mehanika deformiruyushego protyagivaniya kak nauchnaya osnova otsenki kachestva detaley i rabotosposobnosti instrumenta s iznosostoykimi pokryitiyami: Dis.... dokt. tehn. nauk: 05.02.08. – Voronezh, 1993. – 385 s.*
9. *Formoobrazovanie krutoizognutyih otvodov izgibom protyagivayemoy trubyyi* / Rozenberg O. A., Ogorodnikov V. A., Grushko A. V. i dr. *Monografiya. – Vinnitsa : Universum – Vinnitsya, 2004. – 140 s.*

Огородников В. А. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. СМ и ПМ ВНТУ

Архипова Т. Ф. – канд. техн. наук, доц. каф. СМ и ПМ ВНТУ

Деревенько И. А. – канд. техн. наук, доц. каф. ОДТ и ОП ВНАУ

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винниця.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винниця.

E-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, ira.derevenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.03.2016 г.