

ПРОГРАМА

Міністерство освіти і науки України
Кам'янська міська рада
Дніпровський державний технічний університет
НТУ "Дніпровська політехніка"
ГЧМ ім. З.І. Некрасова НАН України
НТУ "Київський політехнічний інститут" ім. Ігоря Сікорського
Уханський університет науки і технології
Дніпровський металургійний комбінат
Білоруський національний технічний університет
НТУ "Львівська політехніка"
Ченстоховський технічний університет
Луцький національний технічний університет
Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського
Кременчуцький колісний завод
НВО "Дніпрофмаш"
ЗАТ "ЮжТехнологія"
ПАТ "ЄВРАЗ ДМЗ"

ПРОГРАМА

**IV МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«МАШИНИ І ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ МЕТАЛУ»**



17 - 20 жовтня 2018 року

**КАМ'ЯНСЬКЕ - ДНІПРО
УКРАЇНА**

15. PLASTICITY OF PRE-DEFORMED BILLET

**Солона О. В., к.т.н., доц., Деревенько І. А., к.т.н., ст. викладач,
Купчук І. М., к.т.н., ст. викладач, Вінницький національний аграрний
університет, м. Вінниця, Україна**

**16. МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАЛКОВ С МЕТАЛЛОМ ПРИ
ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ**

**Подобедов Н. И., к.т.н., с.н.с., Институт черной металлургии
им. З. И. Некрасова НАН України, г. Днепр, Украина**

**17. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ХПТ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ОБЖАТИЯ ПО ТОЛЩИНЕ СТЕНКИ МЕЖДУ ПРЯМЫМ И ОБРАТНЫМ
ХОДАМИ КЛЕТИ**

Пилипенко С. В.¹, к.т.н., доц., Григоренко В. У.², д.т.н., проф.,

¹ - Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь;

**² - Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр,
Украина**

**18. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ШАРОПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПАО «ДМК»**

Штода М. Н.¹, к.т.н., доц., Мельник С. Н.², к.т.н., главн. калибровщик,

Ровков В. Л.², нач. вальцетокарного отделения,

¹ - Днепропетровский государственный технический университет;

**² - ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат», г. Каменское,
Украина**

ДОПОВІДЬ

ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК

Одной из важнейших задач машиностроения является разработка и промышленное освоение эффективных технологий обработки металлов давлением, обеспечивающих высокий уровень эксплуатационных свойств и показателей надежности изделий.

После различных операций обработки металлов давлением формируется технологическое наследие – остаточные напряжения, упрочнение, градиент деформаций, остаточная пластичность и др. 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.

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.

Процессы обработки металлов давлением основаны на способности металлов под действием приложенной нагрузки переходить в пластическое состояние.

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 [2]:

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

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, $\eta = 0$ – сдвиг (рис.1).

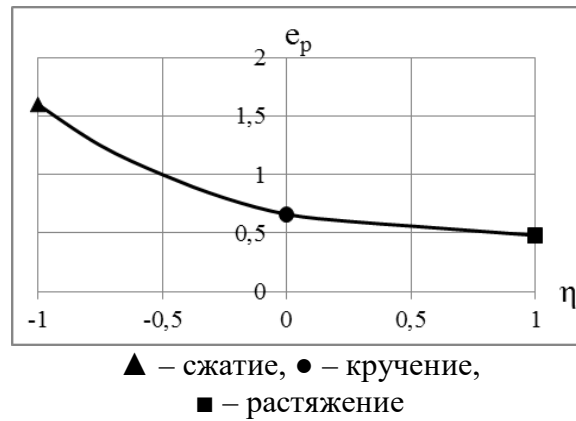


Рис. 1 – Диаграмма пластичности стали 20

В случае изучения технологических процессов обработки давлением листовых материалов разрушение может сопровождаться отрывом либо срезом, иногда наблюдается смешанные виды разрушения.

В работе [3] предлагается в случае разрушения срезом представлять диаграмму пластичности функцией $e_p = f(\theta)$, в которой показатель напряженного состояния

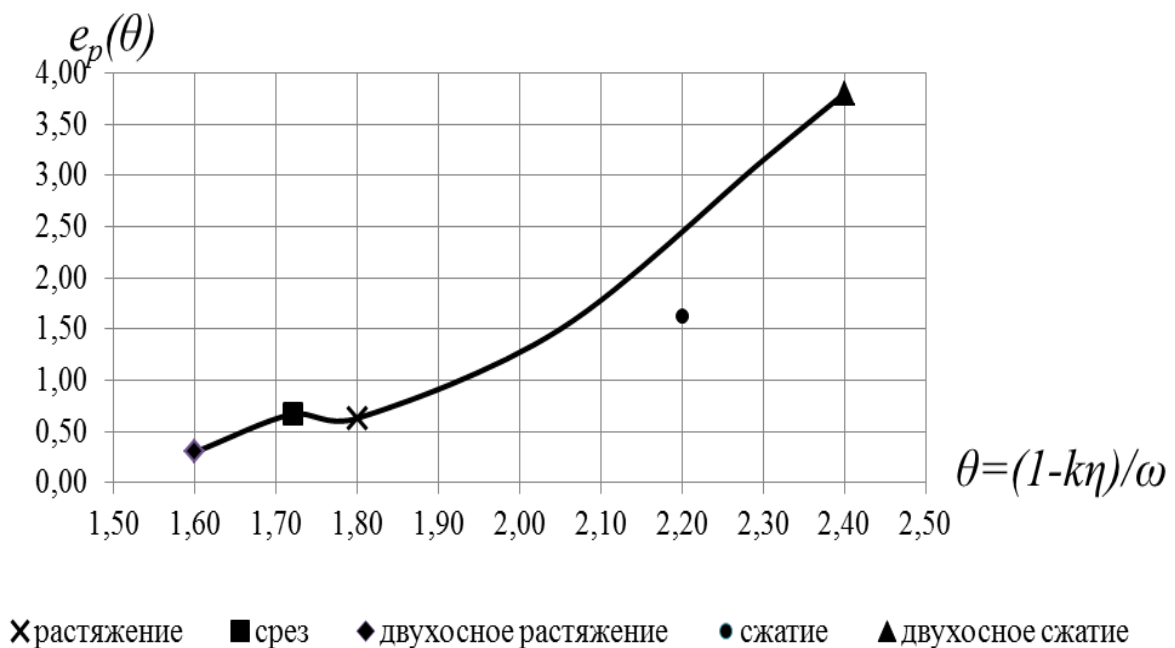
$$\theta = \frac{1 - k\eta}{\omega}, \quad (4)$$

где k – параметр материала, определяемый экспериментально.

Для сталей различных марок его можно принять равным $k = 0,05$; for aluminum alloys, $k = 0,1$ [3]. В случае растяжения – $\theta = 1,8$; сдвига – $\theta = \sqrt{3}$; одноосного сжатия – $\theta = 2,1$; двухосного растяжения – $\theta = 1,6$; двухосного сжатия – $\theta = 2,4$.

$$\omega = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_u}, \quad (5)$$

где τ_{\max} – максимальное касательное напряжение.



×растяжение ■срез ◆двухосное растяжение ●сжатие ▲двухосное сжатие

Рис. 2 – Диаграмма пластичности срезом стали 20

0432 При моделировании разрушения отрывом, когда плоскость разрушения близка к плоскости, на которой действуют максимальные нормальные напряжения в работе [3] предложено диаграммы пластичности представлять в виде единой для различных напряженных состояний функцией $\varepsilon_p = f(\beta)$ в которой

$$\beta = \frac{1-s\eta}{\nu}, \quad (6)$$

где η рассчитывают по (3.8),

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

Здесь σ_1 – наибольшее из главных напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, s – параметр материала, который обычно принимают равным k . и в случае растяжения, $\sigma_u = \sigma_1$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,

$\beta = \frac{[1-s(1)]\sigma_u}{\sigma_u} = 1-s = 0,95$. При сдвиге $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$, $\sigma_u = \sqrt{3}\tau$, $\beta = \sqrt{3}$. При

сжатии $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\sigma$, $\beta = \frac{[1-s(-1)]\sigma_u}{0} = \infty$.

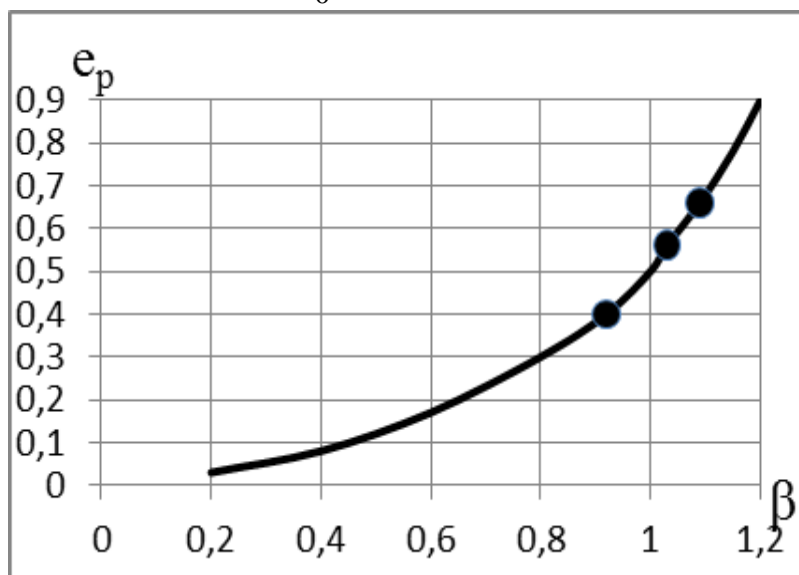


Рис. 3 – Диаграмма пластичности стали 20 в координатах $\varepsilon_p = f(\beta)$

Таким образом, зависимости $e_p(\eta, \theta, \beta)$ – 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 [6].

Если известна начальная диаграмма пластичности компоненты тензора повреждений ψ_x , ψ_{xy} , ... 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:

$$\begin{aligned} \Delta \psi_x &= \beta'_x [\varphi(\bar{e}_0 + e'_0, \eta'_1, \eta'_2) - \varphi(\bar{e}_0, \eta'_1, \eta'_2)] \\ \Delta \psi_{xy} &= \beta'_{xy} [\varphi(\bar{e}_0 + e'_0, \eta'_1, \eta'_2) - \varphi(\bar{e}_0, \eta'_1, \eta'_2)] \dots \end{aligned} \quad (8)$$

Условие разрушения запишем в виде

$$(\psi_x + \Delta \psi_x)^2 + (\psi_{xy} + \Delta \psi_{xy})^2 + (\psi_{yx} + \Delta \psi_{yx})^2 + \dots = 1. \quad (9)$$

Или

$$\Delta \psi_x^2 + \Delta \psi_{xy}^2 + \Delta \psi_{yx}^2 + \dots + 2(\psi_x \Delta \psi_x + \psi_{xy} \Delta \psi_{xy} + \psi_{yx} \Delta \psi_{yx} + \dots) + \psi_0^2 = 1, \quad (10)$$

В формуле (10)

$$\psi_0^2 = \psi_x^2 + \psi_{xy}^2 + \psi_{yx}^2 + \dots \quad (11)$$

Из равенств (8), (10) получаем квадратное уравнение, из которого находим:

$$\varphi(\bar{e}_0 + e'_0, \eta'_1, \eta'_2) = \varphi(\bar{e}_0, \eta'_1, \eta'_2) - D + \sqrt{1 + D^2 - \psi_0^2}, \quad (12)$$

где

$$D = \beta'_x \psi_x + \beta'_{xy} \psi_{xy} + \beta'_{yx} \psi_{yx} + \dots \quad (13)$$

После аппроксимации, получим пластичность деформированного металла:

$$e'_p = e_p \left[-\frac{\bar{e}_0}{e_p} - \frac{1-a}{2a} + \sqrt{\left(\frac{\bar{e}_0}{e_p} + \frac{1-a}{2a} \right)^2 - \frac{D}{a} + \frac{1}{a} \sqrt{1 + a^2 - \psi_0^2}} \right] \quad (14)$$

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 [6].

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} (1 - a + 2ae_u^*/e_p) \beta_{ij} de_u^*/e_p. \quad (15)$$

Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [6] $a = 0,5$.

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:

$$(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij})(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij}) = 1, \quad (16)$$

то из него можно получить выражение для предельной дополнительной деформации растяжения в направлении оси x_1 [5]:

$$\frac{e_{p11}}{e_p} = -\frac{1}{2} - \frac{e_i^*}{e_p} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{e_i^*}{e_p}\right)^2 - \sqrt{6}\psi_{11} + \sqrt{6\psi_{11}^2 + 4(1 - \psi_{ij}\psi_{ji})}}. \quad (17)$$

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

$$\frac{e_p}{\delta_p} = \frac{D_1 b}{200 \delta_p} \frac{e_i^*}{\delta_p} + \frac{D_1 b}{100} \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{100 e_i^*}{D_1 b \delta_p}\right)^2 + \sqrt{2} \left[\psi_s - \psi_\theta + \sqrt{(\psi_s - \psi_\theta)^2 + (1 - \psi_{ij}\psi_{ji})} \right]}, \quad (18)$$

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.

$$\begin{aligned} \psi_\alpha = \psi_\theta &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} + \left(\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} \right)^2 \right] \\ \psi_s &= -(\psi_\alpha - \psi_\theta) = -2\psi_\alpha \\ \psi_{ij}\psi_{ij} &= \frac{1}{4} \left[\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} + \left(\frac{e_i}{e_{p(\eta=2)}} \right)^2 \right]^2 \end{aligned} \quad (19)$$

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 таблице приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений остаточной пластичности.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений остаточной пластичности

Типоразмер отвода	Расчет				Эксперимент		Макс. расхождение %
	ψ	e_{PS}	$e_{Pразд}$	$e_{P\alpha} = e_{P\theta}$	$e_{P\alpha}$	$e_{P\theta}$	
90° 57×4	0,35	0,58	0,27	0,43	0,41	0,37	9,3
90° 89×4,5	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.