

УДК 621. 7: 519.85

Огородников В. А.
Алиева Л. И.
Деревенько И. А.

ПАРАМЕТРЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИАГРАММ ПЛАСТИЧНОСТИ

Обеспечение качества изделий в машиностроении является актуальной задачей современного промышленного производства. В процессах обработки металлов давлением, при которых заготовки подвергаются большим пластическим деформациям, важно отслеживать накопление повреждений и обеспечивать благоприятное технологическое наследие. Прогнозирование пластичности (накопление деформаций вплоть до разрушения) дает возможность отслеживать получение качественных изделий.

В технической литературе с 60-х годов прошлого столетия рассматриваемым вопросам уделяется внимание специалистами в области теории пластичности [1–4]. Развивая поставленные в указанных работах проблемы, авторы обращают внимание на вопросы оценки предельных состояний пластических деформаций тел.

Целью данной работы является анализ различных параметров вида напряженного состояния и их соответствие различным механизмам разрушения пластических материалов в области конечных деформаций. Для достижения указанной цели в работе поставлены задачи:

1. Проанализировать различные параметры напряженного состояния с точки зрения их соответствия механизмам разрушения в процессах обработки металлов давлением.

2. Показать целесообразность применения различных показателей напряженного состояния при оценке деформируемости заготовок в процессах обработки металлов давлением, учитывающих механизмы накопления пластических деформаций в условиях отрыва и среза.

Пластичность металлов зависит от многих факторов, среди которых кроме природы самого металла основными являются термомеханические характеристики процесса: температура, скорость деформации, вид напряженного состояния, история деформирования, градиент деформаций и др. Зависимость пластичности от вида напряженного состояния при простом деформировании фиксированных температурно-скоростных условиях характеризуется диаграммой пластичности, являющейся его механической характеристикой. Для ее построения проводят испытания материала при различных напряженных состояниях и условиях простого нагружения, которые определим как постоянное отношение некоторых инвариантов тензора и девиатора напряжений. При этом должно соблюдаться условие простого нагружения, когда инварианты тензора изменяются пропорционально одному параметру.

Параметры вида напряженного состояния, как правило, конструируются из инвариантов тензора и девиатора напряжений, они должны соответствовать физическим процессам накопления пластических деформаций.

Поскольку напряженное состояние характеризуется тремя основными инвариантами тензора и девиатора напряжений параметр вида напряженного состояния обычно описывают различными соотношениями, состоящими из инвариантов, являющимися постоянными при изменении напряжений в условиях простого нагружения. Согласно уравнениям пластического состояния простое нагружение возникает при простом деформировании, если $\frac{\sigma}{\sigma_i} = \text{const}$. Следуя В. А. Бабичеву, это отношение обычно и принимают за один из показателей напряженного состояния:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где σ – среднее нормальное напряжение, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, σ_i – интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{I_1(T\sigma)}{\sqrt{3I_2(D\sigma)}}, \quad (3)$$

где $I_1(T\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений, $I_2(D\sigma)$ – второй инвариант дивиатора напряжений.

Параметр η удобен при использовании диаграмм пластичности в координатах $\varepsilon_p = f(\eta)$, где ε_p – длина дуги в пространстве вектора деформаций (накопленная интенсивность деформаций к моменту разрушения):

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon_{ij}. \quad (4)$$

Диаграммы пластичности в указанных координатах $\varepsilon_p f(\eta)$ могут быть построены по результатам простейших испытаний: растяжение ($\eta_1 = +1$), сдвиг (кручение) ($\eta_1 = 0$), сжатие ($\eta_1 = -1$). В условиях объемного напряженного состояния учитывают также третий инвариант тензора напряжений в виде показателя [1]:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_i}. \quad (5)$$

В таких случаях используют объемные диаграммы пластичности $\varepsilon_p = f(\eta, \chi)$.

Указанные диаграммы пластичности не учитывают механизм разрушения срезом, при этом накопление деформаций происходит преимущественно в условиях сдвига.

В работе [2] предлагается в случае разрушения срезом представлять диаграмму пластичности функцией $\varepsilon_p = f(\theta)$, в которой параметр вида напряженного состояния:

$$\theta = \frac{1 - k\eta}{\omega}, \quad (6)$$

где

$$\omega = \frac{\tau_{max}}{\sigma_i}. \quad (7)$$

В формуле (7) τ_{max} – максимальное касательное напряжение; k – параметр материала, определяемый экспериментально. Для сталей различных марок его можно принять равным $k = 0,05$, для алюминиевых сплавов $k = 0,1$ [2]. В случае растяжения – $\theta = 1,8$, сдвига – $\theta = \sqrt{3}$, одноосного сжатия – $\theta = 2,1$, двухосного растяжения – $\theta = 1,6$, двухосного сжатия – $\theta = 2,4$.

При моделировании разрушения отрывом, когда плоскость разрушения близка к плоскости, на которой действуют максимальные нормальные напряжения, в работе [2]

предложено диаграммы пластичности представлять в виде единой для различных напряженных состояний функций $\varepsilon_p = f(\beta)$, где:

$$\beta = \frac{1 - s\eta}{\nu}, \quad (8)$$

где η (см. формулу (3)).

$$\nu = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}. \quad (9)$$

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, $\sigma_i = \sigma_1$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\beta = \frac{[1 - s(1)]\sigma_i}{\sigma_i} = 1 - s = 0,95$.

При сдвиге $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$, $\sigma_i = \sqrt{3}\tau$, $\beta = \sqrt{3}$.

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

Показатель напряженного состояния, введенный в работе [1]:

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

где $\chi = 0$ в условиях растяжения, сжатия и кручения.

Для иллюстрации применения рассмотренных показателей напряженного состояния при построении диаграмм пластичности проведены испытания стали 20 на растяжение, сжатие и кручение. Для построения кривой течения в области конечных деформаций испытывали цилиндрические образцы на сжатие, растяжение и кручение.

На сжатие испытывали цилиндрические образцы размерами $h_0 = 15$ мм, $d_0 = 10$ мм. На боковую поверхность цилиндрических образцов вблизи среднего по высоте сечения наносили четыре отпечатка в виде ромба алмазной пирамидой. Подготовленный таким образом образец осаживали до разных степеней деформаций $\varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_i} = 0,076; 0,08; 0,083; 0,087; 0,09; 0,13; 0,29; 0,31; 0,40; 0,57; 0,72; 1,06; 1,22; 1,43$ вплоть до появления видимых трещин, которые, как правило, возникают на экваторе боковой поверхности.

Интенсивность деформаций для степени деформации, при которой не образуется бочкообразование:

$$\varepsilon_i = 2 \ln \frac{d}{d_0}; \quad (10)$$

интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \frac{P}{F_0 \exp(\varepsilon_i)}. \quad (11)$$

При появлении «бочки» накопленная интенсивность деформации:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^\delta \sqrt{\left(\frac{d\varepsilon_z}{d\delta}\right)^2 + 2 \frac{d\varepsilon_z d\varepsilon_\varphi}{d\delta d\delta} + \left(\frac{d\varepsilon_\varphi}{d\delta}\right)^2} d\delta, \quad (12)$$

где параметр $\delta = \frac{h_0 - h}{h_0}$ – характеризует стадию деформации цилиндра.

Если «бочка» незначительна:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_z^2 + 2 \varepsilon_z \varepsilon_\varphi + \varepsilon_\varphi^2}. \quad (13)$$

Интенсивность напряжений σ_i рассчитывают по (11).

В случае существенного бочкообразования:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_\varphi &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r); \\ \sigma_2 = \sigma_r &= 0; \\ \sigma_3 = \sigma_z &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_r), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

интенсивность напряжений по формуле (2).

В соотношениях (14) $\varepsilon_\varphi = \ln \frac{a_i}{a_0}$, $\varepsilon_z = \ln \frac{a_0}{a_i}$, $\varepsilon_r = \varepsilon_\varphi - \varepsilon_z$, a_0, a_i – размеры ромба по оси z до и после осадки.

На рис. 1 показана построенная по этой методике кривая течения стали 20. Кривая течения аппроксимирована уравнением Людвига:

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n, \quad (15)$$

где A и n – коэффициенты аппроксимации, имеющие физический смысл – A – интенсивность напряжений при $\varepsilon_i = 1$, n – показатель степени равный интенсивности деформаций на условной диаграмме растяжения при максимальной силе (момент локализации пластической деформации).

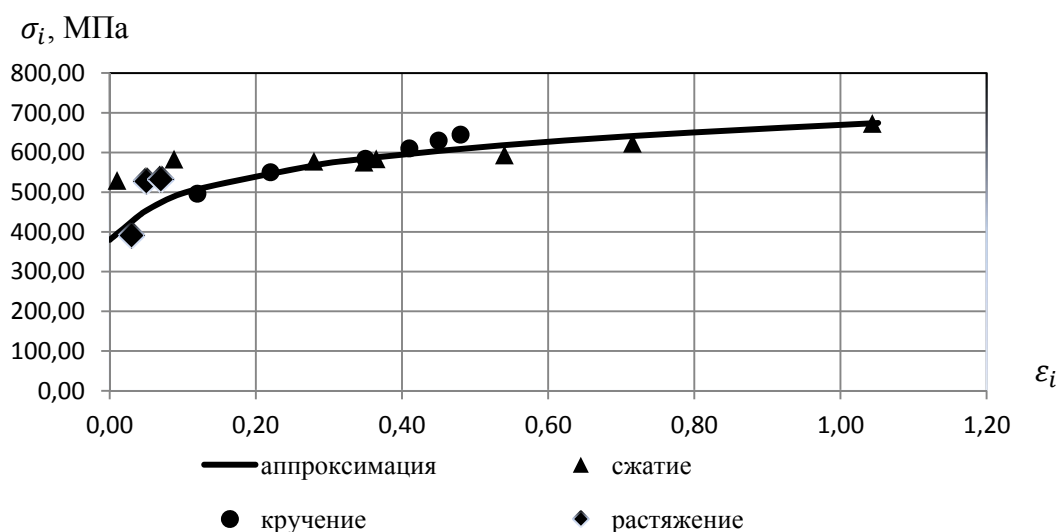


Рис. 1. Кривая течения стали 20

В нашем случае $A = 673$ МПа, $n = 0,15$.

Кривую течения $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ строили по разработанной нами методике [3]:

1. Предварительно измеряют $l_0, d_0, d_{уст.}, d_{ш.}, R_{ш.}$, где l_0, d_0 – длина и диаметр образца до испытания; $d_{уст.}$ – диаметр образца за пределами шейки; $R_{ш.}$ – радиус шейки; $d_{ш.}$ – минимальный диаметр образца в зоне шейки.

2. Рассчитывают $d_{min i}$ – минимальный текущий диаметр образца в месте наибольшей локализации деформаций и последующего разрыва:

$$d_{min i} = \frac{(d_{уст.} - d_{ш.})\Delta l_i + d_{ш.}\Delta l_{уст.} - d_{уст.}\Delta l_{разр}}{\Delta l_{уст.} - \Delta l_{разр}}. \quad (16)$$

Интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i = 2 \ln \frac{d_0}{d_{min i}}. \quad (17)$$

Интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \frac{4 P_i}{\pi d_{min i}^2 \left(1 + \frac{d_{min i}}{8R_i}\right)}. \quad (18)$$

На рис. 1 показана построенная таким способом кривая течения на растяжение, сжатие и кручение. Треугольными точками обозначены экспериментальные данные на сжатие, круглыми точками – на кручение, квадратными точками – на растяжение. Исходя из рис. 1, можно сделать вывод о близком расположении кривых на растяжение, сжатие и кручение. При аппроксимации использовали метод наименьших квадратов и степенную функцию в виде (15). Некоторое расхождение связано с влиянием сил трения при сжатии цилиндрических образцов и принятыми допущениями.

Диаграмму пластичности $\varepsilon_p = f(\eta)$ строили по результатам испытаний на растяжение $\varepsilon_p(\eta = 1)$, кручение $\varepsilon_p(\eta = 0)$, и сжатие $\varepsilon_p(\eta = -1)$. На участке шейкообразования $\varepsilon_p(\eta = 1)$, ε_p рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_p(\eta = 1) = 2 \ln \frac{d_0}{d_{уст.}}, \quad (19)$$

где $d_{уст.} = \frac{d_0 + d_{ш.}}{2}$.

На рис. 2 построена диаграмма пластичности стали 20. Экспериментальные точки $\varepsilon_p(\eta = 1)$, $\varepsilon_p(\eta = 0)$, $\varepsilon_p(\eta = -1)$. Диаграмма аппроксимирована формулой [1]:

$$\varepsilon_p(\eta) = \varepsilon_p(\eta = 0) \exp(-\lambda_i \eta), \quad (20)$$

где $\varepsilon_p(\eta)$ – на степень деформации к моменту разрушения при любом η , $\varepsilon_p(\eta = 0)$ – степень деформации при сдвиге, λ_i – коэффициенты чувствительности пластичности к изменению показателя η . Для участка диаграммы $1 \geq \eta \geq 0$:

$$\lambda_1 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta = 0)}{\varepsilon_p(\eta = 1)}. \quad (21)$$

Для участка диаграммы $0 \geq \eta \geq -1$:

$$\lambda_2 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta = -1)}{\varepsilon_p(\eta = 0)}. \quad (22)$$

Построенные таким образом диаграммы в последующем могут быть использованы для оценки использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением, где механизмом разрушения предполагается преимущественно разрушение отрывом, когда плоскость разрушения близка к плоскости, по которой действуют максимальные нормальные напряжения. Удобство этих диаграмм диктуется параметром η , нормированном на единицу в условиях растяжения $\eta = 1$, сжатия $\eta = -1$ и на ноль в условиях сдвига ($\eta = 0$ при сдвиге).

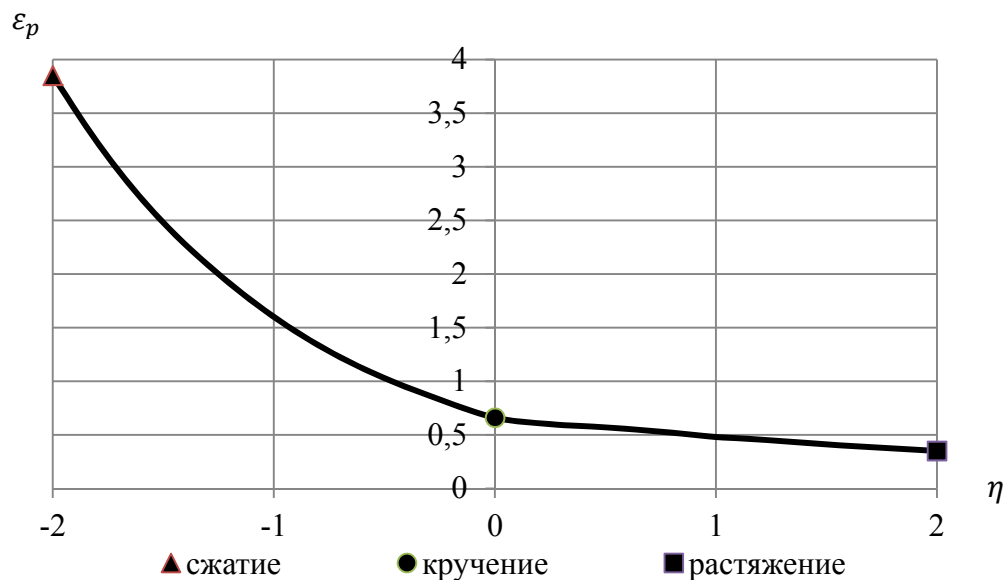


Рис. 2. Диаграмма пластичности стали 20

В случае изучения технологических процессов обработки металлов давлением, в которых преобладают механизмы разрушения срезом, целесообразно использовать диаграмму пластичности в координатах $\varepsilon_p(\theta)$. При этом аппроксимация таких диаграмм пластичности имеет вид [2]:

$$\varepsilon_p(\theta) = \frac{\varepsilon_p^+ \operatorname{sh}[f(\theta - \theta^-)] + \varepsilon_p^- \operatorname{sh}[f(\theta^+ - \theta^-)]}{\operatorname{sh}[f(\theta^+ - \theta^-)]}, \quad (23)$$

где $\theta^+ = f(1 - 2\kappa)$ – параметр θ при двухосном равномерном растяжении;

$\theta^- = f(1 + 2\kappa)$ – параметр θ при двухосном равномерном сжатии;

ε_p^+ – деформация разрушения при двухосном равномерном растяжении;

ε_p^- – деформация разрушения при двухосном равномерном сжатии.

Гиперболический синус в (23):

$$sh = \frac{e^x - e^{-x}}{2}. \quad (24)$$

Для сталей различных марок коэффициент k можно принять равным $k = 0,05$ [2]. На рис. 3 показана диаграмма пластичности стали 20, построенная с помощью аппроксимации (23). Экспериментальные точки расположились вблизи расчетной кривой.

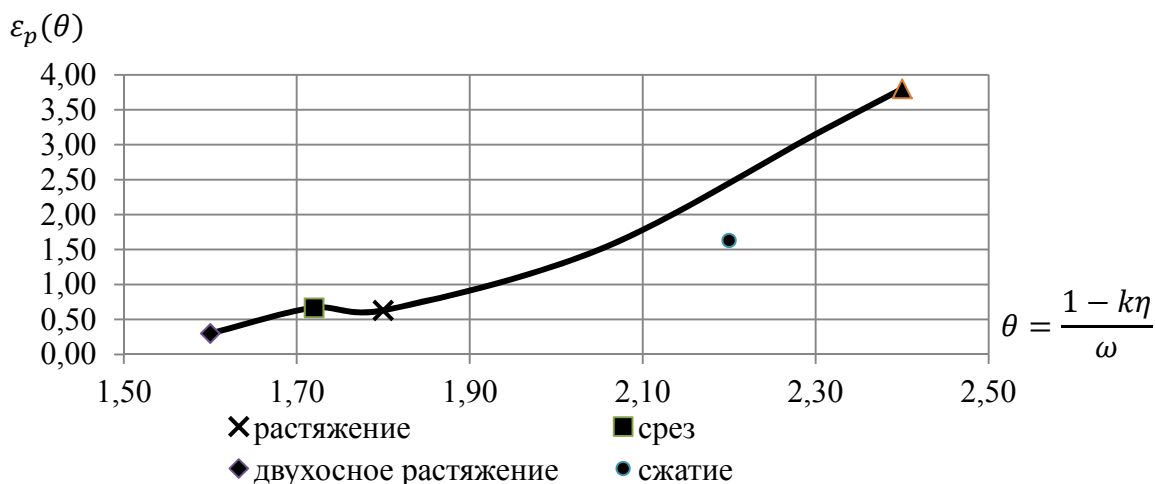


Рис. 3. Диаграмма пластичности срезом стали 20

Анализ представленных диаграмм пластичности позволяет сделать следующие выводы. В случае изучения технологических процессов обработки металлов давлением, где наблюдается механизм разрушения отрывом, когда плоскость разрушения близка к плоскости, на которой действуют максимальные нормальные напряжения, целесообразно пользоваться известными диаграммами пластичности $\varepsilon_p = f(\eta)$, в которых показатель $2 \geq \eta \geq -5$ меняется в широком диапазоне и охватывает практически все известные технологические процессы обработки металлов давлением, включая такие экзотические, как процессы интенсивной пластической деформации, в частности процесс винтовой экструзии – процессы накопления деформаций [4]. В таких процессах параметр напряженного состояния η может принимать значительное отрицательное значение. К тому же параметр η удобен для решения практических задач, он нормирован на единицу при растяжении и сжатии. Однако при изучении технологических процессов обработки давлением листовых материалов нас будет интересовать участок диаграммы пластичности, на котором параметр напряженного состояния меняется в пределах $1 \geq \eta \geq 3$. В этом случае диаграмма пластичности стали 20 имеет вид, представленный на рис. 4.

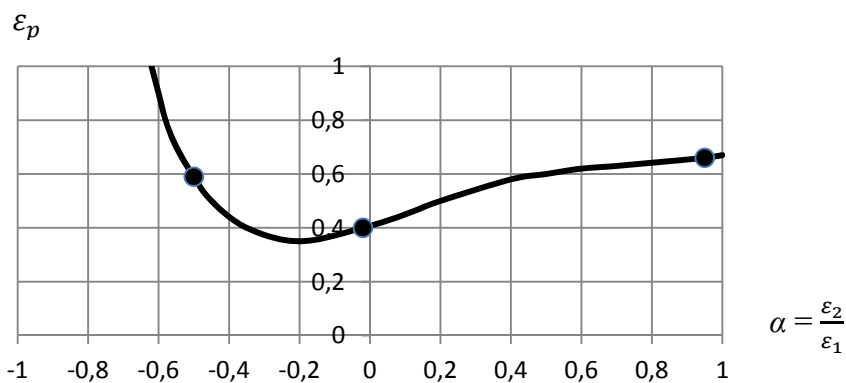


Рис. 4. Диаграмма пластичности стали 20 в координатах $\varepsilon_p = f\left(\alpha = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)$

На рис. 5 показана диаграмма пластичности, построенная в координатах $\varepsilon_p(\eta)$. Из рис. 5 следует, что ε_p (деформация разрушения) изменяется существенно при незначительном изменении параметра η (от 1,73 до 2). Введение параметра β решает указанную проблему. На рис. 6, 7 представлены монотонные кривые предельных деформаций.

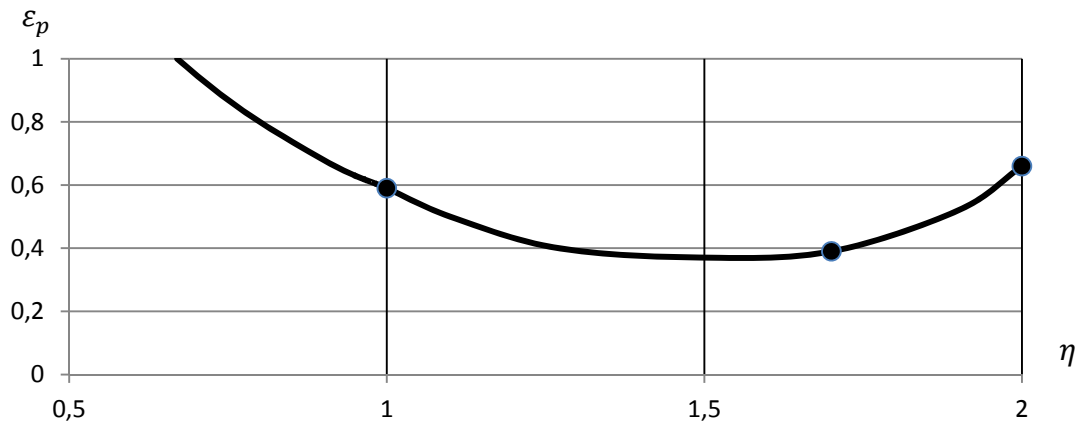


Рис. 5. Диаграмма пластичности стали 20 в координатах $\varepsilon_p = f(\eta)$

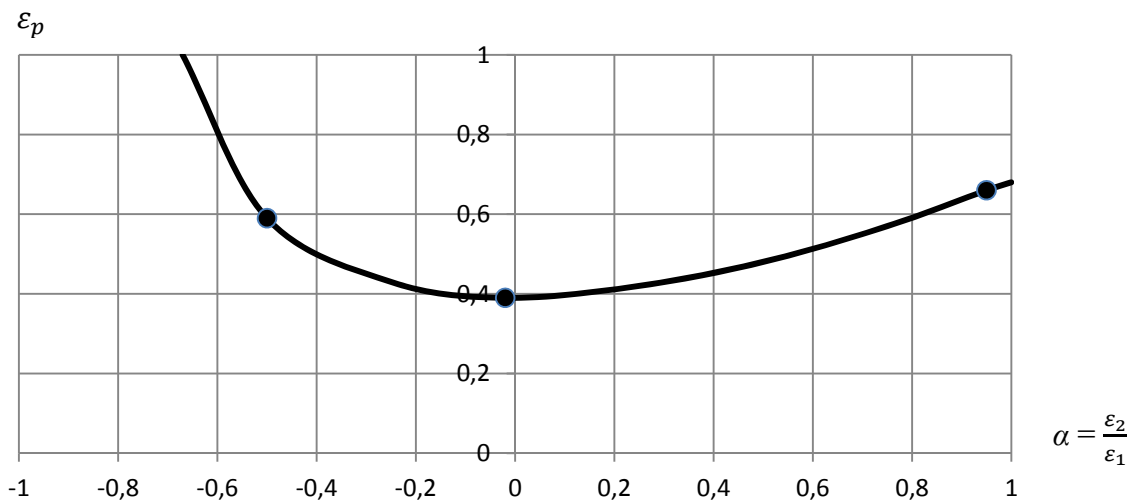


Рис. 6. Диаграмма пластичности стали 20 в координатах $\varepsilon_p = f\left(\alpha = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)$

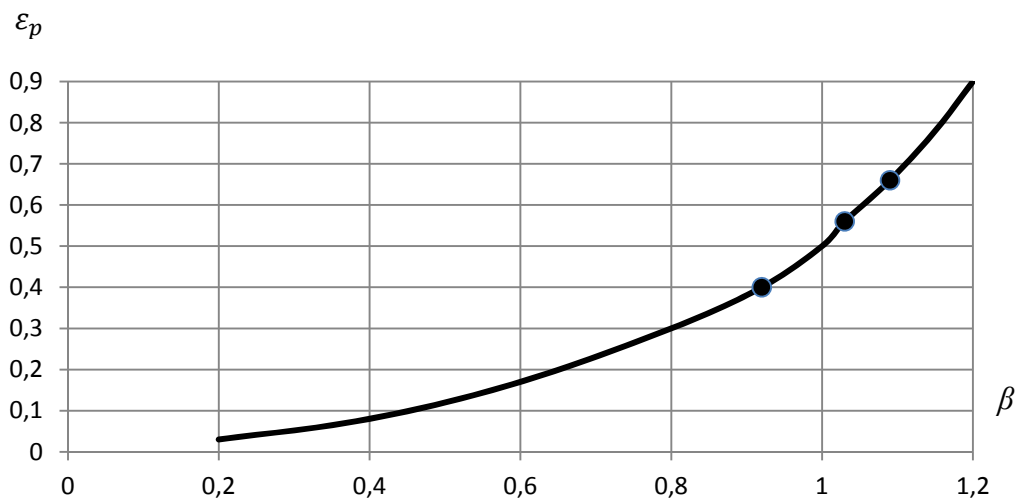


Рис. 7. Диаграмма пластичности стали 20 в координатах $\varepsilon_p = f(\beta)$

В случае изучения технологических процессов, в которых механизм разрушения преимущественно «срез», целесообразно использовать диаграмму пластичности, представленную на рис. 3, рис. 7.

Это касается, главным образом, процессов обработки металлов давлением листовых материалов. В процессах обработки давлением заготовок, сопровождающихся объемной схемой напряженного состояния, в которых возможно разрушение срезом, можно применять диаграмму пластичности, представленную на рис. 2 и на рис. 3 (в зависимости от диапазона изменения показателей напряженного состояния).

ВЫВОДЫ

Проанализированы модели пластичных материалов и рассмотрены параметры модели отказов (разрушение отрывом и срезом).

Показано, что в случае изучения предельного состояния заготовок, обрабатываемых давлением, в которых преобладает механизм разрушения отрывом, целесообразно воспользоваться известными диаграммами пластичности в координатах $\varepsilon_p(\eta)$, где параметр η – отношение гидростатического давления к интенсивности напряжений. Параметр η нормирован на единицу (растяжение, сжатие) и не зависит от свойств материала.

При обработке листовых материалов целесообразно воспользоваться параметром вида напряженного состояния в виде β (8), который позволит получить монотонную функцию зависимости ε_p от β .

Показано также, что в случае изучения процессов обработки давлением листовых материалов, а также процессов с объемной схемой напряженного состояния, в которых наблюдается механизм разрушения в виде среза, физически более оправдано пользоваться диаграммами пластичности $\varepsilon_p = f(\theta)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища шк., 1983. – 175 с.
2. Continuous Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes / Dell H., Gese H., Kepler L., Werner H. and Hooputra H. // SAE – Paper 2001 – 01-1131, New Sheet Steel Products and Steel Metal Stamping (SP – 1614), SAE 2001 world Congress, Michigan, march 5–8, 2001. – P. 113–122.
3. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / О. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Музычук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 8. – С. 16–20.
4. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Ю. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Синков. – Донецк : Фирма «ТЕАН», 2003. – 87 с.

Огородников В. А. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВНТУ;

Алиева Л. И. – канд. техн. наук, доц. кафедры ОМД ДГМА;

Деревенько И. А. – ассистент ВНАУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: vaogorodnikov@ukr.net; ohnevo@i.ua

Статья поступила в редакцию 10.01.2012 г.