

УДК 621.01

Деревенько И. А.

ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

Тенденция повышения качества изделий машиностроения, экономии металла и энергоресурсов растет и продолжает быть актуальной при производстве деталей машин серийного и массового производства. Обострение указанной проблемы в настоящее время связано с удорожанием энергоресурсов и возрастанием конкурентоспособности машинопродукции.

Холодная объемная штамповка является эффективным способом изготовления деталей массового производства. Технологические процессы с использованием операций высадки, осесимметричного прямого и комбинированного выдавливания и др. во много раз производительнее процессов механической обработки. Однако технологические параметры перечисленных операций все еще являются предметом исследований специалистов в области теории обработки металлов давлением. [1, 2]. Усложняются формы заготовок, применяются материалы со сложной реологией, возрастают требования к качеству штампуемых изделий – все это вызывает необходимость проведения комплексных исследований, в результате которых необходимо решить следующие задачи:

- уточнить методы расчета напряженно-деформированного состояния анизотропно-упрочняющихся тел;
- оценить использованный ресурс пластичности с помощью критериев разрушения;
- оценить пластичность металлов в условиях объемного напряженного состояния;
- рассмотреть вопросы моделирования процессов объемного формоизменения на основе гипотезы о кинематическом и силовом подобии;
- разработать рациональные параметры процессов холодного прямого и комбинированного выдавливания, обеспечивающие качество заготовок и предотвратить брак от разрушения металла.

Целью данной работы является исследование деформируемости и качества заготовок в условиях комбинированного формоизменения.

В дальнейшем рассмотрим технологические процессы, в которых реализуется сложное монотонное нагружение, при этом показатель напряженного состояния, определяемый отношением первого инварианта тензора напряжений к интенсивности напряжений, меняется от $\eta = -5$ до $\eta = 2$. Это процессы прямого осесимметричного выдавливания и комбинированного выдавливания с разделением очага деформации. Напряженное состояние будем рассчитывать по соотношениям, учитывающим анизотропное упрочнение, ресурс пластичности определим по критериям, учитывающим историю деформирования. Параметры диаграмм пластичности определим экспериментально.

Напряженное состояние при прямом осесимметричном выдавливании определяли с помощью соотношений теории течения с привлечением кинематики (линий тока):

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_{ij}. \quad (1)$$

Гидростатическое давление находим интегрированием интегрального и дифференциального уравнений равновесия:

$$\frac{d\sigma}{dx_j} \delta_{ij} + \frac{d}{dx_j} \left[\frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \left(\frac{dv_i}{dx_j} + \frac{dv_j}{dx_i} \right) \right]. \quad (2)$$

Компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z, \tau_{rz}$ позволяют рассчитать показатель напряженного состояния η и в сочетании с накопленной интенсивностью деформаций образуют пути деформирования $\eta = \eta(e_u)$.

При проектировании технологических процессов получения качественных изделий, необходимо управлять параметрами процесса таким образом, чтобы обеспечить благоприятное технологическое наследие, изменение обжатий, смену знака деформаций, переход на деформирование с иной геометрией инструмента – все это вызывает анизотропию пластичности, изменение механических и физических свойств изделий. При расчете напряженно – деформированного состояния в таких задачах как комбинированное выдавливание, радиальное и осесимметричное выдавливание, процессы высадки и др. возникают задачи учета деформационной анизотропии, что в свою очередь, приводит к усложнению расчетного аппарата теории пластичности.

В случае необходимости учета анизотропного упрочнения, следуя работе [3] уравнение координат центра поверхности нагружения согласно теории Бакхауза представим в виде:

$$\alpha_{ij} = \frac{1 - \beta(e_u)}{2} \sigma_u(e_u) \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} [1 - \beta(e_u^*)] \sigma_u(e_u^*) \varphi(e_u - e_u^*) \frac{d^2 \varepsilon_{ij}}{de_u^{*2}} de_u^*, \quad (3)$$

где $\varphi(e_u - e_u^*)$ – функция, характеризующая наследственное влияние истории нагружения; e_u^* – переменная подинтегральной функции.

В теории пластичности принято, что функции $\varphi(e - e^*)$, $\sigma_u(e_u)$, $\beta(e_u)$ – не зависят от вида напряженного состояния и истории нагружения и их можно рассматривать как характеристики материала.

Привлекая соотношения ассоциированного закона пластического течения, запишем уравнения состояния в виде:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{de_u}{\bar{\sigma}_u(\bar{e}_u)} (S_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_u(\bar{e}_u)$ – характеристики материала (диаграмма деформирования):

$$\bar{\sigma}_u(\bar{e}_u) = \frac{1 + \beta(e_u)}{2} \sigma_u(e_u), \quad (5)$$

где $\beta(e_u) = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma(e)}$ – отношение условного предела текучести на сжатие с допуском на пластическую деформацию $e = 0,002$ к напряжению растяжения при деформации e , $\sigma_u(e_u)$ – кривая течения изотропного материала в координатах:

– интенсивность напряжений – σ_u :

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}; \quad (6)$$

– интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}. \quad (7)$$

Если подставить координаты α_{ij} (3) в соотношение (4), то получим с учетом формулы (5) компоненты девиатора напряжений в виде:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} [1 - \beta(e_u^*)] \sigma_u(e_u^*) \varphi(e - e_u^*) \frac{d^2 \varepsilon_{ij}}{de_u^{*2}} de_u^*. \quad (8)$$

Рассмотрим основные деформационные критерии разрушения:

– Г. А. Смирнова-Аляева:

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)} \leq 1; \quad (9)$$

– В. Л. Колмогорова:

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \frac{de_u}{e_p(\eta)} \leq 1; \quad (10)$$

– В. А. Огородникова [4]:

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \left(1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u} \frac{d\chi}{de_u} \right) \frac{[e_u(\eta, \chi)]^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}} \leq 1. \quad (11)$$

Критерий (9) не учитывает историю деформирования и может применяться для расчета предельного формоизменения, если $\eta = \text{const}$. Критерий (10) учитывает линейный характер накопления повреждений, критерий (11) учитывает нелинейный характер накопления повреждений, а также третий инвариант тензора напряжений. В дальнейшем для расчета ресурса пластичности по указанным критериям необходимо располагать механическими характеристиками в виде диаграмм пластичности.

Поскольку напряженное состояние характеризуется тремя основными инвариантами тензора и девятиатомного 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 $\frac{\sigma}{\sigma_u} = \text{const}$.

Следуя В. А. Бабичкову, это отношение обычно и принимают за один из показателей напряженного состояния:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (12)$$

где σ – среднее нормальное напряжение; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, σ_u – интенсивность напряжений (6).

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}, \quad (13)$$

где $I_1(T_\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений; $I_2(D_\sigma)$ – второй инвариант девятиатомного 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):

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon_{ij}. \quad (14)$$

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 [3]:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (15)$$

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

$$\theta = \frac{1 - k\eta}{\omega}, \quad (16)$$

где
$$\omega = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_u}. \quad (17)$$

В формуле (17) τ_{\max} – максимальное касательное напряжение; k – параметр материала, определяемый экспериментально. Для сталей различных марок его можно принять равным $k = 0,05$, для алюминиевых сплавов $k = 0,1$ [4]. 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 [4] предложено диаграммы пластичности представлять в виде единой для различных напряженных состояний функций $\varepsilon_p = f(\beta)$, где:

$$\beta = \frac{1 - s\eta}{\nu}, \quad (18)$$

где η (см. формулу (13)).

$$\nu = \frac{\sigma_1}{\sigma_u}. \quad (19)$$

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

Рассмотрим процесс комбинированного радиально-прямого выдавливания для получения полых деталей из различных материалов. На рис. 1 показаны детали, изготовленные по упомянутой технологии. Эксперименты проведены в Донбасской машиностроительной академии совместно с Алиевой Л. И. и Жбанковым Я. Г. [6].

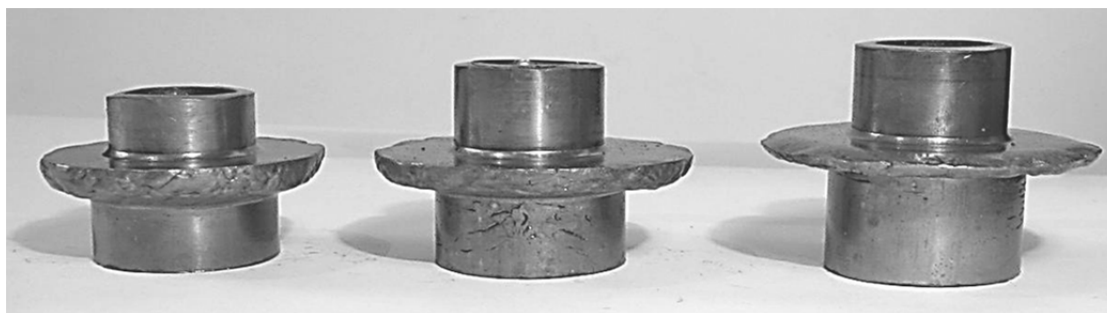


Рис. 1. Полые детали, полученные комбинированным радиально-прямым выдавливанием

На заготовки из свинца нанесена делительная сетка, искажение которой представлено на рис. 2.

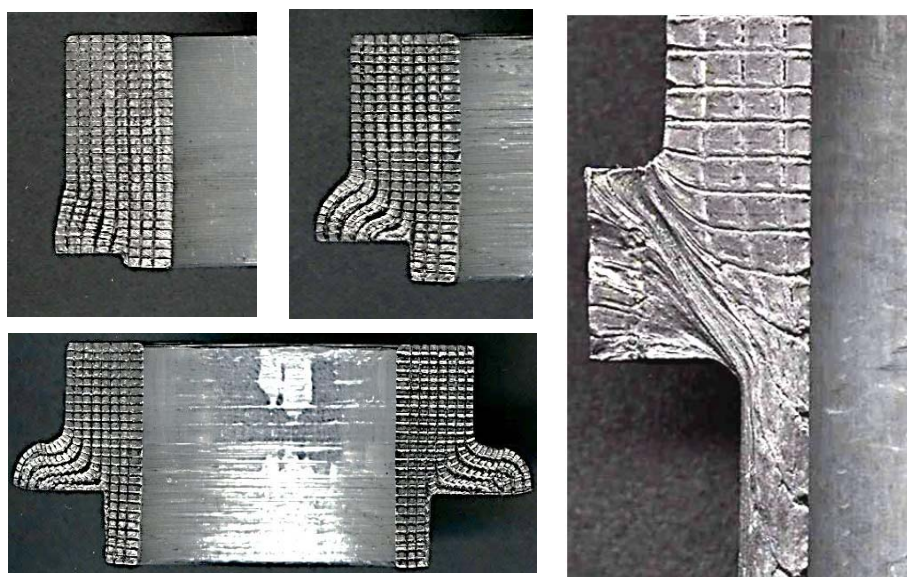


Рис. 2. Картины искажения делительной сетки

В очаге деформации в месте перехода сатурнового кольца в меньший диаметр наблюдается механизм разрушения срезом, следовательно, для оценки предельных деформаций необходимо использовать критерий (11), в котором подинтегральная функция имеет вид $e_p = e_p(\theta)$, где θ – рассчитывается по формуле (16). Рассматриваемые в дальнейшем технологические процессы сопровождаются объемной схемой напряженного состояния. Деформируемость заготовок в этих условиях ограничена не только параметрами процесса (обжатие, геометрия инструмента), но и пластичностью металла, мерой которой будем считать величину e_p (см. формулу 14).

В критериях разрушения (10), (11) – подинтегральные функции включают диаграммы пластичности в координатах $e_p = e_p(\eta)$, являющиеся механическими характеристиками материала. Вопрос – зависят ли диаграммы пластичности от схемы напряженного состояния все еще остается открытым. Для ответа на этот вопрос нами обработаны экспериментальные данные проведенные в работе [4]. Эксперименты проводили на совместное кручение и растяжение в камере высокого давления до 2000 МПа в условиях $\eta = \text{const}$.

Предельные деформации в условиях совместного кручения и растяжения считали по формуле:

$$e_p = \sqrt{1 + \frac{3}{4} \frac{\text{tg}^2 \alpha}{[1 - z_p^{-1,5}]^2}} \ln z_p, \quad (20)$$

где α – угол сдвига, измеряемый на инструментальном микроскопе между осью цилиндрического образца и винтовой линией вблизи излома; z – безразмерный параметр удлинения соответствующий разрушению образца. Экспериментальные данные о пластичности в условиях переменного гидростатического давления в области изменения показателя напряженного состояния $0 \leq \eta \leq 1$ не были обработаны в работе [4]. Нами впервые обработаны и представлены эти результаты на рис. 3.

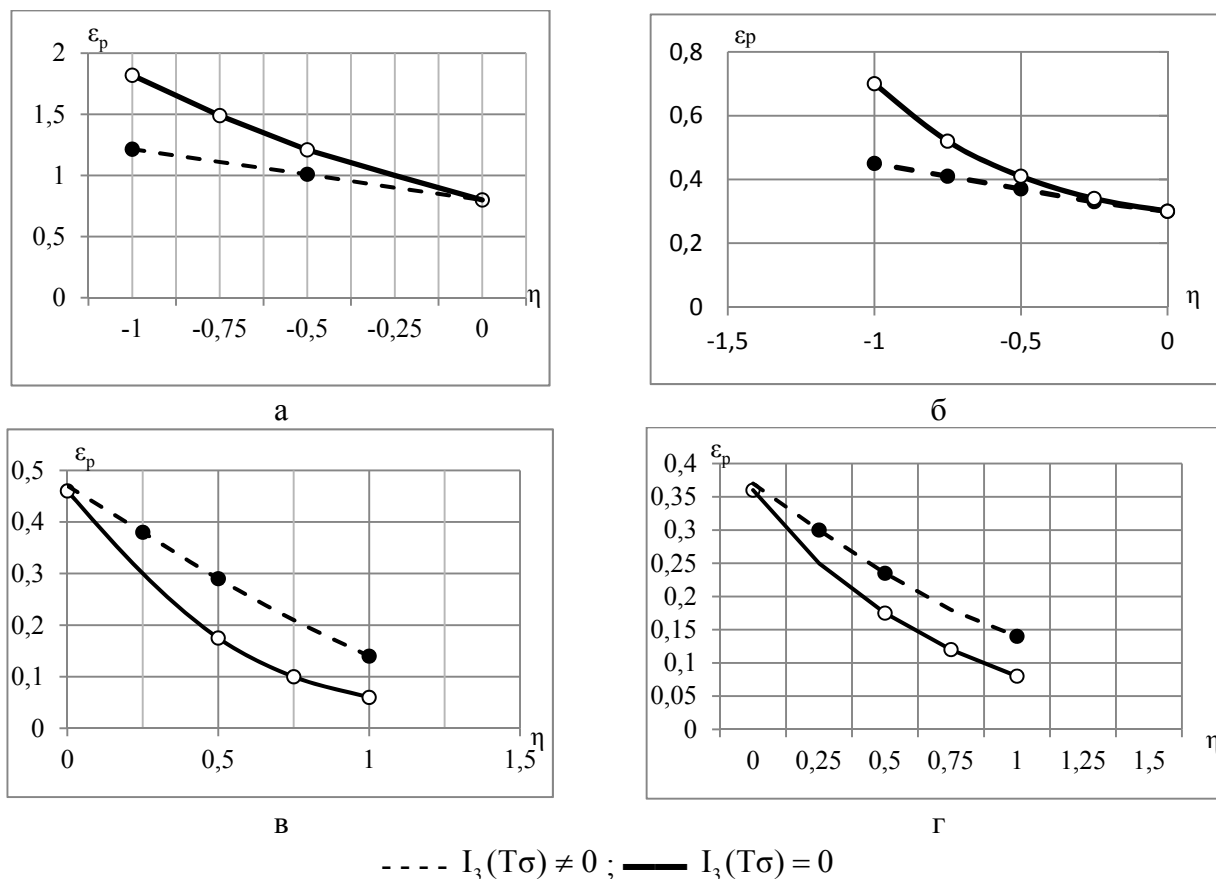


Рис. 3. Влияние $I_3(T\sigma)$ на пластичность (опыты М + q, Р + М + q):
а – сталь 45; б – дюралюминий Д1; в – сталь P18; г – сталь P6M5

Из полученных результатов следует, что в области изменения показателя $-1 \leq \eta \leq 0$ третий инвариант тензора напряжений подавляет пластичность, в области $0 \leq \eta \leq 1$ увеличивает пластичность по сравнению с пластичностью, определяемой по диаграмме пластичности, построенной в условиях $I_3(T\sigma) = 0$. В связи с изложенным выше, появляется возможность объяснить известное «аномальное» возрастание пластичности при растяжении материалов, образующих шейку. Пластичность при растяжении часто оказывается выше, чем при сдвиге (кручении). Это противоречит известной концепции – ужесточение схемы напряженного состояния снижает пластичность.

В работе [7] показано, что зарождение трещины в центре образца при растяжении материалов образующих шейку и последующий разрыв образца практически не изменяют величину предельной степени деформации, рассчитанной по формуле:

$$\varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_{iu}}, \quad (21)$$

где d_0 , d_{iu} – диаметры образца до и после испытания. Следовательно «аномальное» возрастание пластичности в области изменения показателя $1 \leq \eta \leq 2$ связано с влиянием третьего инварианта тензора напряжений на пластичность, а не с кинетикой развития трещины.

Таким образом, диаграмма пластичности $\varepsilon_p = \varepsilon_p(\eta)$ зависит от вида напряженного состояния. Предлагается строить участок диаграммы в пределах $1 \leq \eta \leq 2$ путем введения поправки λ (смещение диаграммы по оси абсцисс), учитывающей влияние третьего инварианта тензора напряжений в виде показателя:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sigma_u} \quad (22)$$

Величина этой поправки рассчитывается по формуле:

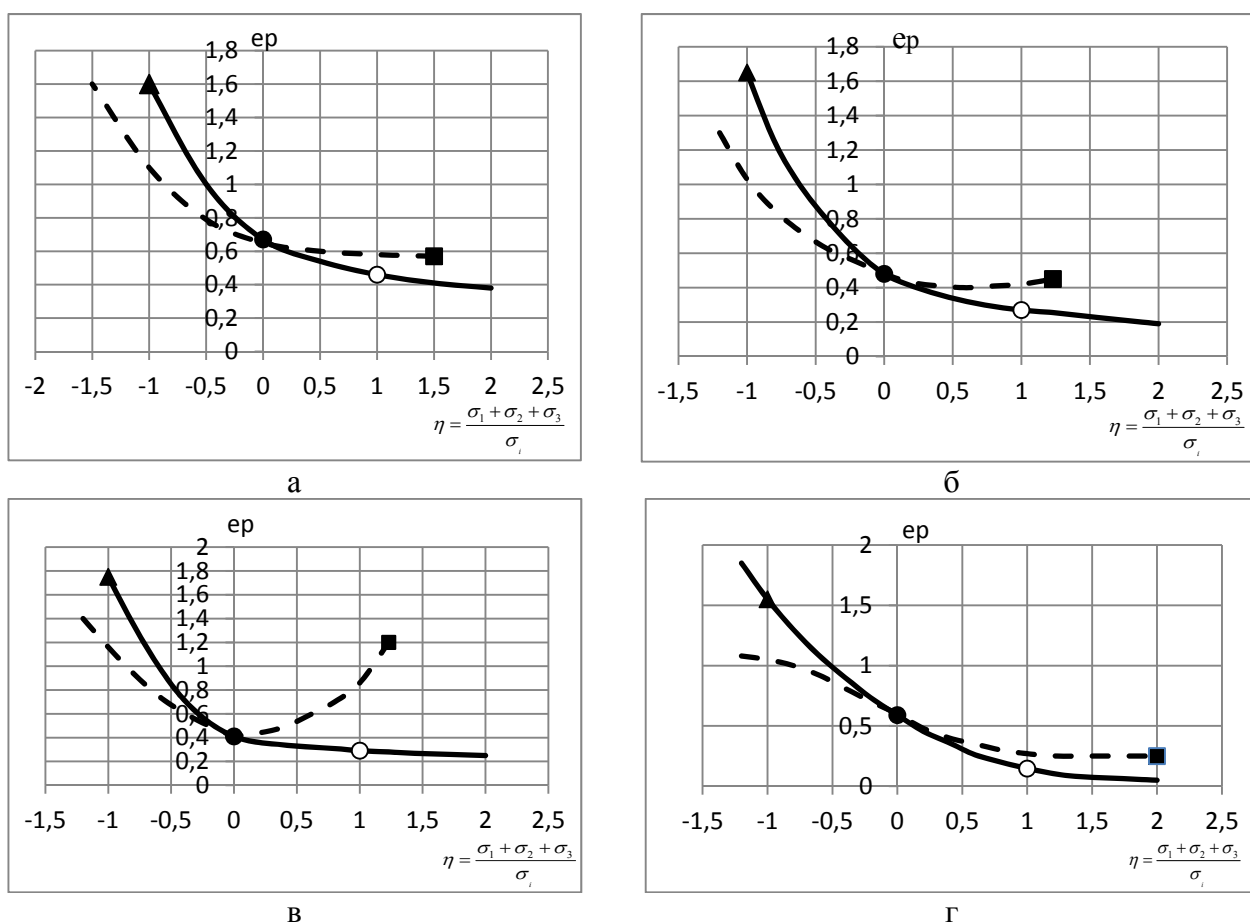
$$\lambda = \eta \left[1 + f(\eta) \frac{\chi}{\sigma_u} \right], \quad (23)$$

где $f(\eta)$ описывается полиномом:

$$f(\eta) = A\eta^2 + B\eta + C. \quad (24)$$

Коэффициенты A, B, C полинома получены в расчете для сталей 45, 40X. Их величина для исследованных материалов слабо зависит от свойств материала.

На рис. 4 сопоставлены диаграммы пластичности сталей 20, 35, 20Г2Р, 40X построенные нами в условиях $\eta = \text{const}$, когда показатель $\chi = 0$ и в условиях $\eta = \text{const}$, когда показатель $\chi \neq 0$.



----- $I_3(T_\sigma) \neq 0$; — $I_3(T_\sigma) = 0$, ■ — растяжение;

▲ — сжатие; ● — кручение; ○ — устойчивое растяжение

Рис. 4. Диаграммы пластичности:

а — сталь 20; б — сталь 35; в — сталь 20Г2Р; сталь 40X

Круглыми точками отмечены результаты испытаний при растяжении, однако разрушение считали в момент предшествующий зарождению шейки (потеря устойчивости пластического деформирования). Квадратными точками отмечен момент полного разрыва образца, при этом показатель напряженного состояния считали по формуле П. Бриджмена:

$$\eta = \left[1 + 3 \ln \left(1 + \frac{d_u}{4R} \right) \right], \quad (25)$$

где d_u – диаметр шейки; R – радиус шейки, определяемый по формуле (см. рис. 5).

$$R = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}; \quad (26)$$

$$\sigma_1 = \sigma_z = \sigma_u \left[1 + \ln \left(1 + \frac{d_u}{4R} \right) \right]; \quad (27)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\varphi = \sigma_u \ln \left(1 + \frac{d_u}{4R} \right); \quad (28)$$

$$\sigma_u = \frac{P}{\pi \frac{d_u^2}{4} \left(1 + \frac{d_u}{8R} \right)}. \quad (29)$$

Показатель:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (30)$$

Полученные расчетным путем квадратные точки нанесены на рис. 4. Расхождение предельных деформаций при $\eta = 2$ между пунктирной линией $I_3(T\sigma) \neq 0$ и сплошной $I_3(T\sigma) = 0$ составляет около 30 %.

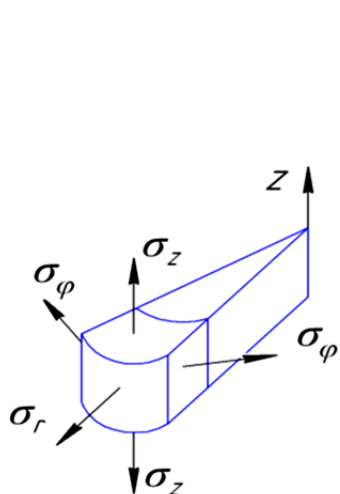


Рис. 5. Эскиз утонения цилиндрического образца при растяжении

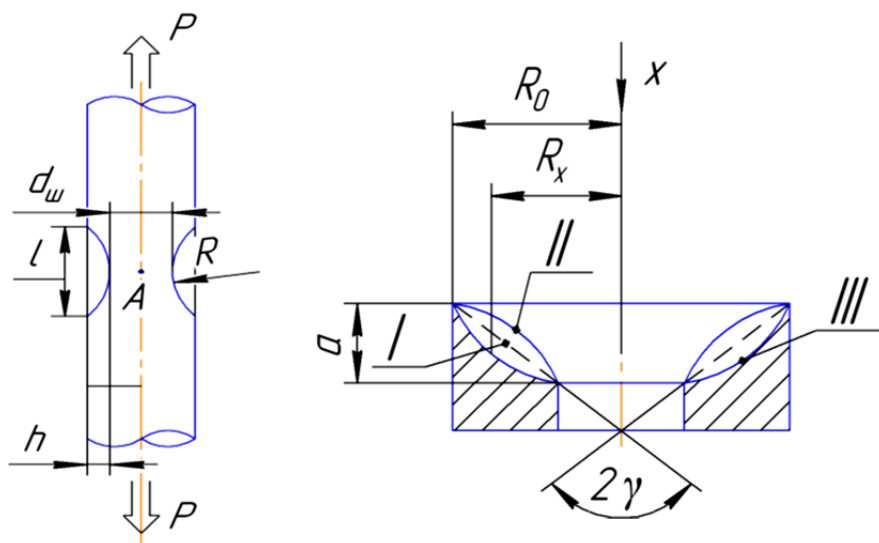


Рис. 6. Матрица

Таким образом, диаграмма пластичности не является единой для различных напряженных состояний. «Аномальное» возрастание пластичности связано с влиянием третьего инварианта тензора напряжений. Проиллюстрируем предлагаемую методику построения диаграмм пластичности для процесса прямого осесимметричного выдавливания. Воспользуемся экспериментально-расчетными данными работы [4], в которой приведены результаты расчета компонент тензора напряжений σ_{ij} , показатель напряженного состояния и накопленной интенсивности деформаций $\bar{\epsilon}_u$ в процессе осесимметричного выдавливания меди, латуни ЛС62, латуни ЛС59-1, дюралюминия Д16 через матрицы с углами раствора $2\gamma = 180, 120, 90, 60$ и матриц сигмоидального профиля. Вогнутый профиль матрицы (III) – рассчитан по уравнению:

$$R_x = R_0 \exp\left(\frac{-0,33x}{a}\right), \quad (31)$$

где R_x, R_0, a – показаны на рис. 6.

Нами рассчитаны показатели η, χ для построения путей деформирования частиц материала, принадлежащих оси симметрии выдавливаемых заготовок из меди через матрицы различной геометрии. Будем считать полученные пути деформирования, представленные на рис. 7, не зависящими от свойств материалов (гипотеза о кинематическом подобии и подобии путей деформирования) [8]. На рис. 7. представлены также диаграммы пластичности латуни ЛС 59-1, ЛС62, дюралюминия Д16, построенные с учетом и без учета третьего инварианта тензора напряжений.

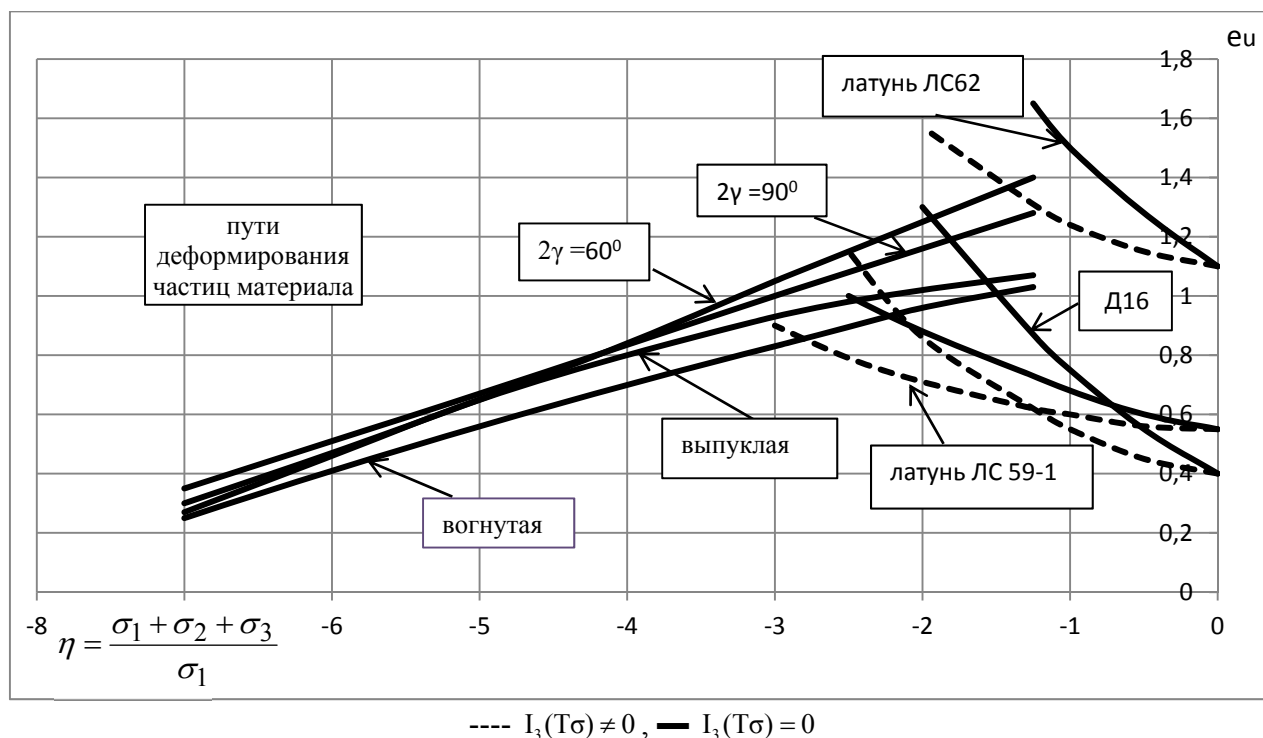


Рис. 7. Пути деформирования частиц материала заготовки из модельного материала (меди) вдоль оси симметрии матриц различной геометрии в координатах $e_u = e_u(\eta)$

С помощью критерия деформируемости (11) рассчитан ресурс пластичности для матриц различной геометрии с учетом и без учета третьего инварианта тензора напряжений. На рис. 8. представлены полученные результаты, из которых следует, что неучет третьего инварианта тензора напряжений приводит к ошибке от 16 до 46 %. При этом неучет третьего инварианта занижает ресурс пластичности.

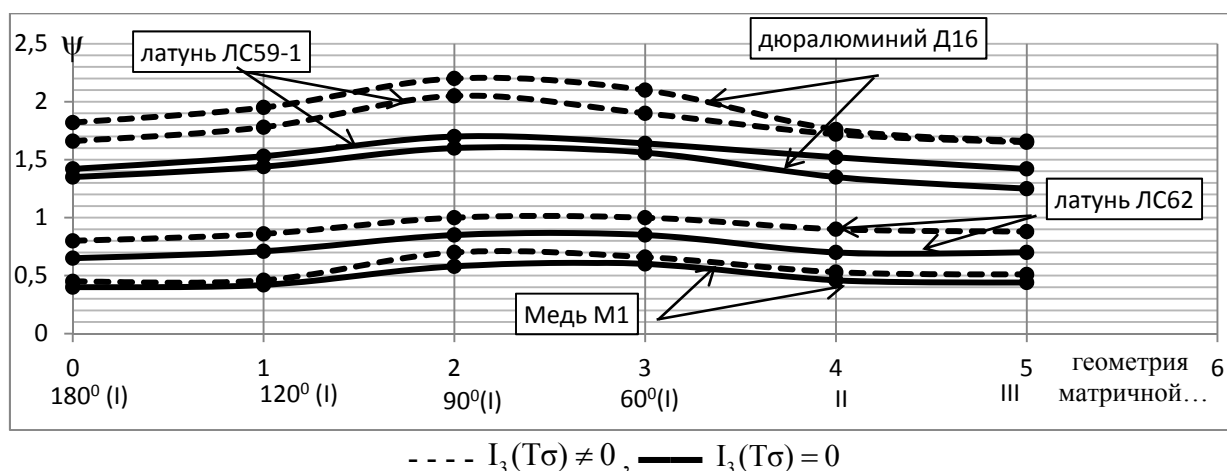


Рис. 8. Ресурс пластичности, рассчитанный для матриц различной геометрии при осесимметричном выдавливании заготовок из цветных металлов

ВЫВОДЫ

Усовершенствованы методы расчета напряженно-деформированного состояния анизотропно-упрочняющихся тел. Показано, что пластичность в условиях объемного напряженного состояния зависит от третьего инварианта тензора напряжений.

Разработана методика построения диаграмм пластичности в области изменения показателя напряженного состояния от одноосного до двухосного растяжения, учитывающая влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность без привлечения экспериментов в камере высокого давления.

Предложено выбрать рациональные параметры (геометрию матриц, обжатие) процесса осесимметричного прямого выдавливания на основе оценки деформируемости заготовок с помощью критерия разрушения, учитывающего первый и третий инварианты тензора напряжений на пластичность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование комбинированно поперечно-прямого выдавливания / Алиева Л. И., Борисов Р. С., Жбанков Я. Г., Мороз Б. С. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудіванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 45–48.
2. Алиев И. С. Технологические возможности процесса последовательного радиально-прямого выдавливания / И. С. Алиев, О. К. Савченко, О. В. Чучин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 11. – С. 21–25.
3. Дель Г. Д. Деформируемость материалов с анизотропным упрочнением / Г. Д. Дель // Прикладные задачи механики сплошных сред. – Воронеж, 1988. – С. 16–19.
4. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Выща школа, 1983. – 176 с.
5. Continuous Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes, SAE – Paper 2001 – 01 – 1131, New Sheet Steel Products and Steel Metal Stamping (SP – 1614) / Dell H., Gese H., Kepler L., Werner H., Hooputra H. // SAE 2001 world Congress. – Michigan, march 5–8, 2001. – P. 113–122.
6. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник ДДМА : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 1 (11). – С. 13–19.
7. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Рябов В. А., Калтин Ю. Г., Перфилов В. И., Петров П. А., Филиппов Ю. К. – Машиностроение, 201. – 244 с.
8. Моделирование напряженного состояния в процессах объемного формоизменения на основании гипотезы о подобии путей деформирования / Огородников В. А., Рвачев М. А., Покрас В. Д., Гайдамак О. Л. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – № 11. – С. 2–4.

Деревенько И. А. – ассистент ВНАУ.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: ohnevo@i.ua

Статья поступила в редакцию 16.05.2012 г.