

УДК 621.777.01

Алиева Л. И.

КРИТЕРИИ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Применение теории деформируемости для решения технологических задач обработки металлов давлением, позволяет дать ответ не только на вопрос – какова предельная степень деформации обрабатываемой заготовки. К этой задаче примыкают еще две практически важные и связанные с ней задачи [1, 2]. Оценка степени использования пластичности важна также в тех случаях, когда после данной операции следует термообработка, поскольку свойства материала после термообработки находятся в зависимости от степени использования запаса пластичности, полученного на предыдущих операциях. Как известно, существует предельное значение степени использованного запаса пластичности, превышение которого приводит к резкому ухудшению механических свойств материала. Вторая задача состоит в оценке остаточной пластичности полученной детали. Это необходимо для выяснения возможности реализации последующей операции, связанной с пластическим деформированием, а также получения изделий с необходимыми физико-механическими свойствами [2, 3].

В литературе к настоящему времени опубликовано достаточно много критериев, с помощью которых можно оценивать использованный ресурс пластичности. Однако их практическое применение для различных процессов обработки металлов давлением часто вызывает затруднения, связанные с целесообразностью применения того или иного подхода.

Обработка материалов давлением сопровождается большими пластическими деформациями, которые вызывают значительные необратимые перемещения частиц материала при относительно малых изменениях напряжений. В связи с этим, использование для оценки предельного формоизменения критериев разрушения, в которых накладываются ограничения на напряжения, дает вероятность существенных ошибок.

В работах [2–7] экспериментально установлено, что пластичность зависит не только от уровня достигнутых деформаций, схемы напряженного состояния, но и от скорости изменения показателей напряженного состояния.

Процесс нагружения в микрообъеме сплошной среды задается шестью независимыми функциями времени или пятью функциями (девиаторные функции). Классическая теория пластичности (теория А. А. Ильюшина) построена на этих представлениях. Однако такое описание истории нагружения не всегда оправдано, т.к. необходимо проводить исследования для неограниченного количества траекторий. Кроме того, при одних и тех же условиях формоизменения, траектории нагружения будут различными, а процессы нагружения частиц материала приходится исследовать в шестимерном пространстве, что вызывает ряд трудностей методического характера, растет трудоемкость и объем расчетов, утрачивается наглядность.

Целью работы является анализ возможности применения критериев деформируемости для оценки ресурса пластичности в технологических задачах пластического формообразования.

В связи с этим, учитывая, что в современные деформационные критерии входят безразмерные показатели напряженного состояния, предлагается рассматривать пространство напряжений в безразмерных показателях напряженного состояния. С этой целью для обоснования выбора этих показателей представим тензор напряжений в виде

$$\sigma_{ij} = \tau S_{ij}^0 + \sigma \delta_{ij}, \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{\sigma_{ij}\delta_{ij}}{3}$ – гидростатическое давление, $S_{ij}^0 = \frac{S_{ij}}{\tau}$ – компоненты направляющего тензора; S_{ij} – компоненты девиатора напряжений; τ – интенсивность девиатора напряжений ($\tau^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$). Поделив левую и правую часть выражения (1) на σ_u , получим

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_u} = \sqrt{\frac{2}{3}} S_{ij}^0 + \frac{\eta}{3} \delta_{ij} \quad (2)$$

В пространстве главных напряжений (2) имеет вид

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \left(\eta - \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \quad \frac{\sigma_2}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \left(\eta + \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \quad \frac{\sigma_3}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \left(\eta - \frac{3 + \mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right). \quad (3)$$

Следуя терминологии А. А. Ильюшина, при сложном нагружении одной из основных характеристик траектории нагружения является ее кривизна. Траекторию нагружения можно задавать в трехмерном пространстве с координатами e_u, η, μ_σ (e_u – степень деформации, η – показатель напряженного состояния, μ_σ – параметр Надаи-Лоде) с помощью кривой $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$. Зависимости $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$ имеют название «пути деформирования», в отличие от термина «траектории нагружения» в пространстве напряжений и «траектории деформаций» в пространстве деформаций [6, 7].

Отметим также, что при $\eta = const$ и $\mu_\sigma = const$ нагружение будет простым, а при $\eta = \eta(e_u), \mu_\sigma = \mu_\sigma(e_u)$ – сложным.

В общем случае напряженного состояния зависимость пластичности (предельной деформации e_p) от схемы напряженного состояния можно задать поверхностью $e_p(\eta, \mu_\sigma)$. Кривизну траекторий «пути деформирования» будем задавать при помощи параметра θ .

Главным преимуществом задания траекторий нагружения в пространстве безразмерных показателей напряженного состояния η, μ_σ а также параметра χ , введенным в работе [3]

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

заключается в том, что в этом случае вид траектории нагружения (пути деформирования) однозначно определяется условиями формоизменения, характерными для исследуемого процесса и практически не зависит от механических свойств материала. Это позволяет моделировать процессы обработки давлением на модельных материалах, в этом случае необходимо располагать кривыми упрочнений $\sigma_u = f(\varepsilon_u)$ и диаграммами пластичности $\varepsilon_p = f(\eta, \mu_\sigma, \chi)$ [8].

Был проведен анализ экспериментальных данных, полученных в работе [3] путем испытания цилиндрических образцов из различных материалов в условиях совместного кручения и растяжения по различным программам деформирования. При этом рассмотрены пути деформирования для случаев $\frac{d\eta}{de_u} > 0$, кривизна траектории $\theta = \frac{d^2\eta}{d^2e_u} = 0$, а $\frac{d\eta}{de_u}$ находится в

пределах: в случае $\frac{d\eta}{de_u} > 0$ значение $\frac{d\eta}{de_u} = 0,07 \div 25$, в случае $\frac{d\eta}{de_u} < 0$ значение

$$\frac{d\eta}{de_u} = (-0,2) \div (-0,9).$$

Расчет предельных деформаций проводили по критериям Г. А. Смирнова-Аляева [9]

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)} \leq 1, \quad (5)$$

В. Л. Колмогорова [10]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \frac{de_u}{e_p(\eta)} \leq 1 \quad (6)$$

и В. А. Огородникова [3]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \left(1 + 0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u} \right) \frac{e_u^{0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_u}}} \leq 1. \quad (7)$$

Сопоставление результатов расчета по критериям (5), (6), (7) с экспериментальными данными показало, что пути деформирования можно представить в виде прямых, наклоненных к оси деформаций. При этом уравнение пути деформирования имеет вид $\eta = Be_u$, где значение В ($B = 0, 4; 1,25; 1,4; 2,0; 2,86; 5,0$) зависело от заданной программы нагружения.

При этом кривизна траектории деформаций $\theta = \frac{d^2\eta}{d^2e_u} = 0$.

Задавшись значением использованного ресурса пластичности $\Psi=1$, определяли верхний предел интеграла e_u^* в критериях (6) и (7). В критерии (5) $e_p(\eta)$ определяли в месте пересечения пути деформирования с диаграммой пластичности. Результаты расчета для стали Р18 представлены на рис. 1,а, на котором отображена зависимость коэффициента влияния истории деформирования на предельную деформацию $w = \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = \text{const})}$ от скорости изменения показателя напряженного состояния $\frac{d\eta}{de_u}$.

На рис. 1, а расчет w (отношение фактической деформации к расчетной) по критерию (5) обозначен 1; расчет w по критерию (6) обозначен 2; расчет w по критерию (7) обозначен 3.

Из рис. 1,б следует, что вторая производная от пути деформирования влияет на пластичность. Если $\theta > 1$, коэффициент влияния истории деформирования существенно возрастает. Так, для сталей 45 и Р9 коэффициент w достигает величины 1,4. При этом, для стали 45 это влияние оказывается существенным при небольших изменениях кривизны пути деформирования, для стали Р9 максимальное значение коэффициента w достигнуто при $\frac{d\eta}{de_u} > 5$.

Величина коэффициента w получена в результате расчета предельных деформаций по критериям (5), (6) и (7), отнесенных к предельной деформации, найденной пересечением диаграммы пластичности с путем деформирования. Кривая 3 на рис. 1,а построена в координатах $w = f\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)$, где коэффициент w равен отношению экспериментально определенной деформации разрушения к предельной деформации, полученной пересечением диаграммы пластичности с путем деформирования. Как следует из полученных результатов, с ростом производной от показателя η растет коэффициент влияния истории деформирования на пластичность.

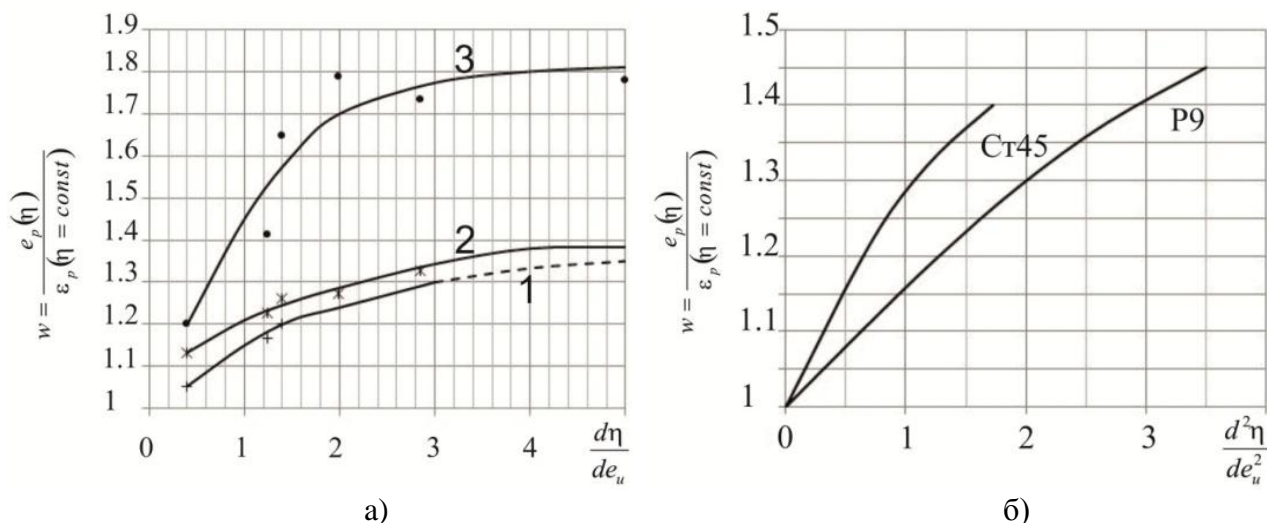


Рис. 1. Зависимость коэффициента влияния истории деформирования w от скорости изменения показателя η (а) и кривизны пути деформирования (б)

Для пути деформирования частиц материала $\eta = 5e_u$ результаты расчета по критериям (5), (6), и (7) показали: $e_p = 0,1$ по критерию (5), $e_p = 0,2625$ по критерию (6), $e_p = 244$ по критерию (7). Фактическая величина деформации в момент разрушения составила $e_p = 0,2325$. Отклонение результатов расчета по критериям (5), (6), и (7) и эксперимента соответственно составило 57%, 12,9% и 4, 8%.

Таким образом, рассматривая технологические процессы обработки металлов давлением, в которых частицы металла подвергаются сложному нагружению, при котором $\frac{d\eta}{de_u} > 5$, наиболее достоверные результаты дает расчет по критерию (7).

Результаты, изложенного выше анализа экспериментальных данных, указывают на заметное влияние скорости изменения показателя напряженного состояния в виде параметра $\frac{d\eta}{de_u}$. Если $\frac{d\eta}{de_u}$ растет, то влияние истории деформирования на величину предельных деформаций возрастает (e_p выше по сравнению с величиной e_p , определенной по диаграмме пластичности). В случае изменения знака производной $\frac{d\eta}{de_u}$ пластичность падает.

ВЫВОДЫ

Анализ феноменологических критериев разрушения показал, что критерии Г.А. Смирнова-Аляева, В.Л. Колмогорова, В.А. Огородникова, основанные на скалярном представлении повреждений, дают одинаковые результаты расчета предельных деформаций для случаев, когда показатели напряженного состояния постоянны.

В тех случаях, когда пути деформирования являются функциями, на величину предельных деформаций оказывает влияние первая и вторая производные от показателей напряженного состояния. При этом, если $\frac{d\eta}{de_u} > 5$ коэффициент влияния истории деформирования на пластичность достигает максимального значения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородников В. А. Качество заготовок и прогнозирование ресурса пластичности в современных технологиях обработки давлением / В. А. Огородников, В. И. Ковальчук // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии : сб. науч. тр. – Краматорск–Славянск : ДГМА, 2003. – С. 226–233.
2. Огородников В.А. Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении : монография / В.А. Огородников, И.А. Деревенько, Л. И. Алиева. – Винница : ВНТУ, ООО «Меркьюри-Подолье», 2016. – 176 с. – ISBN 978-966-2696-69-1.
3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев: Головне вид-во «Вища школа», 1983. – 175 с.
4. Огородников В. А. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / В. А. Огородников, Л. И. Алиева, И. А. Деревенько // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Машинобудування». – 2012. – №64. – С. 201–207. – ISSN 0372–6053.
5. Алиева Л. И. Влияние гидростатического давления и истории его изменения на пластичность в задачах обработки металлов давлением / Л.И. Алиева, В.А. Огородников // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 118–128.
6. Алиева Л. И. Феноменологические критерии разрушения и их применение в задачах технологической механики / Л. И. Алиева, В. А. Огородников // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» 14–17 октября 2014 года. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 33–39.
7. Алиева Л. И. Оцінка технологічної деформівності при обробці металів тиском з урахуванням схем напруженого стану / Л. І. Алієва, В. А. Огородніков, О. В. Грушко // Научный Вестник ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (16Е). – С. 4–21. – Электронный доступ: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1\(16E\)_2015/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1(16E)_2015/article/3.pdf).
8. Огородников В. А. Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотез о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования / В. А. Огородников, А. В. Грушко, И. А. Деревенько // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 4(34). – С. 46–52. – ISSN 2076-2151.
9. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формоизменения материалов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
10. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.

Статья поступила в редакцию 18.05.2016 г.