

PACS: 62.20.-x

В.А. Огородников

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Винницкий национальный технический университет  
Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина  
E-mail: ova@inmt.vstu.vinnica.ua

*Работа посвящена установлению зависимости пластичности металлов от гидростатического давления. Показано, что пластичность зависит не только от первого, но и от третьего инварианта тензора напряжений, а также от скорости их изменения. Для получения обоснованных результатов зависимости пластичности от гидростатического давления проведены опыты в камере высокого давления на цилиндрических образцах из сталей P18, P6M5 и P12, подвергаемых совместному кручению и растяжению на фоне высокого давления. Показано, что пластичность описывается поверхностью в координатах двух безразмерных показателей напряженного состояния.*

При холодной пластической деформации пластичность зависит в основном от схемы напряженного состояния и законов ее изменения в течение всего процесса формообразования. Для задания траектории нагружения в камере высокого давления предлагается принять трехмерное пространство, в качестве координат которого выбираются два безразмерных показателя напряженного состояния и максимальная интенсивность деформаций. В качестве показателей напряженного состояния можно принять

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u} \quad [1], \quad (1)$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad [2] \quad (2)$$

либо

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

Преимущество последнего показателя, учитывающего влияние третьего (кубического) инварианта тензора напряжений на пластичность, заключается

ся в том, что при плоском напряженном состоянии  $\chi = 0$ . В таких случаях зависимость пластичности от схемы напряженного состояния можно исследовать, пользуясь феноменологической теорией деформируемости, в основе которой лежит гипотеза о том, что эта зависимость описывается единой диаграммой пластичности  $e_p(\eta)$ , а история нагружения задается кривыми (пути деформирования). Показатель  $\chi$  удобно использовать для оценки объемности напряженного состояния (последнее реализуется при  $\chi \neq 0$ ).

Пластичность при таком состоянии можно описать поверхностью, вид которой является фиксированным. Предельные деформации определяются с помощью критериев деформируемости и зависят от истории деформирования – скорости изменения показателей напряженного состояния  $\frac{d\eta}{de_u}$  и  $\frac{d\chi}{de_u}$ .

В работе [5] рассматриваются различные критерии разрушения для процессов обработки металлов давлением, сопровождающихся конечными деформациями. Не рассматривая критерии пластичности, применяемые в курсах сопротивления материалов, обратим внимание на критерий вида

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{d\bar{\epsilon}_f}{F(\eta, \xi)} = 1, \quad (4)$$

в котором безразмерные показатели напряженного состояния  $\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}$  и  $\xi = \frac{27}{2} \frac{I_3}{\bar{\sigma}^3}$  отражают влияние инвариантов тензора и девиатора напряжений, где  $I_3 = S_1 S_2 S_3$  – произведение трех девиаторов напряжений,  $\bar{\sigma}$  – эквивалентное напряжение.

Следует отметить, что критерий (4) есть по существу критерий В.Л. Колмогорова, отличием является лишь функция  $F(\eta, \xi)$ . Предполагается, что накопление повреждений происходит по линейному закону. В наших работах [3,4] в качестве параметра, учитывающего влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность, предлагается выражение вида (3).

В работе [4] предложено строить диаграммы пластичности в координатах  $e_p$ – $\eta$ – $\chi$ , а значения предельных накопленных деформаций рассчитывать с помощью критерия, учитывающего влияние инвариантов тензора и девиаторов напряжений:

$$\int_0^{e^*} (1+f) \frac{e_u^f de_u}{e_p^*[\eta(e_u)]^{1+f}} = 1, \quad (5)$$

где  $f = 0.2 \arctg \left( \frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)$ , а  $\frac{d\eta}{de_u}$  и  $\frac{d\chi}{de_u}$  – скорости их изменений.

Анализ работ [5,6], в которых рассмотрены различные критерии разрушения, показывает, что ни в одном из приведенных критериев показатели

напряженного состояния, предлагаемые авторами (кстати, они используют показатели, широко применяемые в работах [1–4,7,8], без ссылок на них), не обоснованы физически.

Пластичность существенно зависит от гидростатического давления, а вопрос о том, как она зависит от истории деформирования (траектория нагружения при наличии третьего инварианта тензора девиатора либо тензора напряжений), все еще остается открытым.

Таким образом, по-прежнему актуальны экспериментальные обоснования показателей напряженного состояния и истории деформирования (вид ядер функции в критериях разрушения).

Эта задача может быть решена опытами в камерах высокого давления, в которых имеется возможность управлять инвариантами тензора напряжений. Например,  $\eta$  и  $\chi$  могут оставаться постоянными в процессе деформирования либо изменяться по различным траекториям.

В работе [4] приведены соотношения, позволяющие рассчитывать программу нагружения цилиндрических образцов, подвергаемых совместному кручению и растяжению в камере высокого давления, а также рассчитывать накопленную интенсивность деформаций в  $(P + M + q)$ -опытах при  $\eta = \text{const}$ ,  $\chi = \text{const}$  или при  $\eta = \eta(e_u)$ ,  $\chi = \chi(e_u)$ .

Основное преимущество подхода, при котором траектория нагружения задается в пространстве безразмерных показателей, заключается в том, что ее вид однозначно определяется условиями деформирования, характерными для исследуемого процесса, и практически не зависит от механических свойств деформируемого металла. Это открывает возможности для компьютерного моделирования и выбора материалов для заготовок, при этом необходимо знать параметры аппроксимирующих функций кривых течения и поверхности пластичности  $F(\eta, \chi)$ . Свойства же материала слабо влияют на траектории деформирования – отклонения составляют на более 5–10%, что согласуется с результатами, приведенными в работе [4] для процессов осесимметричной и радиальной осадки, холодной высадки, поперечного выдавливания, осесимметричного выдавливания.

В качестве примера приведем результаты расчета использованного ресурса пластичности по критерию (3) и критерию Г.Д. Деля, учитывающим направленный характер накопления повреждений [7] для процесса формообразования внутреннего шлицевого профиля обжатию на оправке [8]. Для указанного процесса определены наиболее опасные области, для которых рассчитывали использованный ресурс пластичности  $\eta$  на разных стадиях деформирования заготовки.

На рисунке представлены результаты расчета  $\psi$  вдоль линий контакта шлица оправки, а также рассогласование результатов вычислений  $\psi(\eta)$ ,  $\psi(\chi)$ ,  $\psi_{ij}(\eta)$ ,  $\psi(\eta)$  по критерию (3) и критерию Г.Д. Деля [7]. Из полученных данных следует, что величины использованного ресурса пластичности, рассчитанные с учетом влияния  $I_3(T_\sigma)$ , оказались больше значений  $\psi$ , рассчитанных

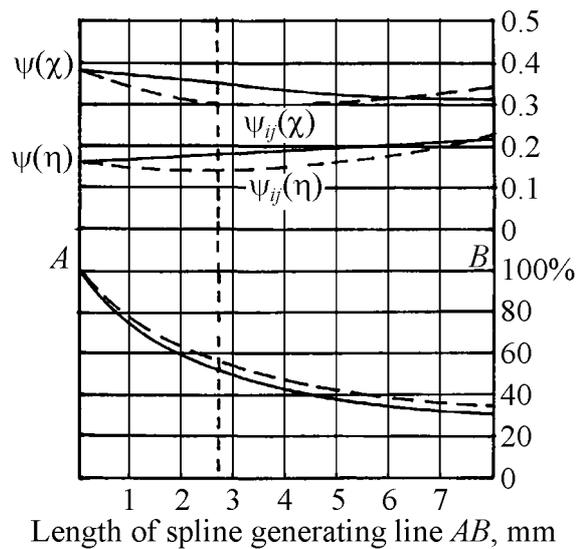


Рис. Ресурс пластичности вдоль линии контакта шлица: — — расчет по критерию (3), - - - по критерию [7]

без его учета. При этом величина расхождения зависит от показателей  $\eta$  и  $\chi$ . С уменьшением  $\eta$  (повышением гидростатического давления) растет влияние  $I_3(T_\sigma)$  на величину предельных деформаций.

### Выводы

1. Показана необходимость учета третьего инварианта тензора напряжений на пластичность деформируемых заготовок в условиях объемного напряженного состояния.

2. Несмотря на разнообразие применяемых в критериях разрушения показателей напряженного состояния, необходимо их экспериментальное обоснование. Это можно сделать в камере высокого давления, где возможно реализовать траектории нагружения  $\eta = \text{const}$ ,  $\chi = \text{const}$ ,  $\eta = \eta(e_u)$ ,  $\chi = \chi(e_u)$ .

1. Г.А. Смирнов-Аляев, Сопротивление материалов пластическому деформированию, Машиностроение, Ленинград (1978).
2. С.И. Губкин, Пластическая деформация металлов, Metallurgizdat, Москва (1961).
3. В.А. Огородников, В.Б. Киселев, И.О. Сивак, Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы), УНІВЕРСУМ-Вінниця, Винница (2005).
4. В.А. Огородников, Оценка деформируемости металлов при обработке давлением, Вища школа, Киев (1983).
5. T. Wierzborski, Y. Bao, Y-W. Lee, Y. Bai, Int. J. Mech. Sci. **47**, 719 (2005).
6. T. Wierzborski, L. Xue, Impact and Crashworthiness Lab Report № 136 (2005).
7. Г.Д. Дель, в сб.: Физика и техника высоких давлений, Наукова думка, Киев (1983), вып. 11, с. 28.
8. В.А. Огородников, О.В. Нахайчук, В.И. Музычук, в сб.: Прогрессивные технологии и оборудование кузнечно-штамповочного производства, Н.Ф. Шпунькин, С.А. Типалин (ред.), МГТУ «МАМИ», Москва (2003), с. 66.

*V.A. Ogorodnikov*

## INFLUENCE OF HYDROSTATIC PRESSURE ON PLASTICITY OF METALS

The paper deals with establishing the dependence of plasticity of metals on hydrostatic pressure. It is shown that plasticity depends not only on the first invariants tensor of pressure, but also on the third invariant and the speed of their change. Tests were carried out in a high-pressure chamber with steel cylindrical samples of P18, P6M5 and P12 quality, subjected to joint torsion and tension on the background of a high pressure for receiving the proved results of the dependence of plasticity of metals on hydrostatic pressure. As a result we show that plasticity is represented as a surface in coordinates of two dimensionless parameters of the stressed state.

**Fig.** Plasticity resource along the line of spline contact: — – calculation by criterion (3), - - - – by criterion [7]