

Р. И. Сивак¹, канд.техн.наук., И. Г. Савчинский², канд.техн.наук., И. О. Сивак³, д-р.техн.наук.

1 - Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница, Украина

2 - Союз Кузнецов России

3 - Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НЕМОНОТОННОМ НАГРУЖЕНИИ

Запропоновано методику оцінки пластичності металів при немонотонному навантаженні в основу якої покладено гіпотезу про те, що пошкодження мають направлений характер і описуються тензором другого рангу. В якості направляючого тензора вибрані компоненти направляючого тензора напружень. Прийнято, що руйнування наступає при умові, коли зортка тензора пошкоджень дорівнює одиниці. Запропонована умова руйнування використана для оцінки величини граничних деформацій при деформуванні по дволанкових траєкторіях навантаження. Отримані залежності величини граничної деформації від кута зламу дволанкової траєкторії навантаження та від величини ступеня деформації перед зломом.

The method of estimation of plasticity of metals is offered at the unmonotonous loading in basis of which a hypothesis is fixed that damages have the directed character and described the tensor of the second grade. In quality a tensor the components of tensor of tensions are chosen. It is accepted that destruction comes subject to the condition, when faltung of tensor of damages equals unit. The condition of destruction is offered d for the estimation of of maximum deformations at deformation on the doublelink trajectories of loading. Dependences of of maximum deformation are on the corner of fracture of doublelink trajectory of loading and from the of degree of deformation before a fracture.

Анализ процесса накопления повреждений при пластической деформации показывает, что дефекты кристаллического строения возникают в самом начале пластической деформации, а затем последовательно развиваются и видоизменяются. Различными экспериментальными методами было доказано, что плотность повреждений возрастает пропорционально степени деформации [1 - 4]

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_u$ - интенсивность скоростей деформаций,

t – время деформирования с момента начала пластической деформации до рассматриваемого деформированного состояния.

Процесс накопления повреждений в элементарном объеме зависит от физической природы металла и истории нагружения, то есть от закономерностей развития напряженно-деформированного состояния. Интенсивность накопления повреждений может быть существенно снижена изменением характера нагружения, например, при немонотонном нагружении. В этом случае возможно частичное залечивание дефектов, возврат дислокационной структуры, возникновение дополнительных полос скольжения, что приводит к значительному увеличению суммарных деформаций до разрушения. Напряженное состояние в элементарном объеме и его изменение в процессе нагружения можно задать траекторией нагружения в пространстве тензора напряжений [5]. Такой подход используется в основном при исследовании пластичности металлов с позиций физики твердого тела. При оценке влияния истории нагружения на пластичность в процессах обработки металлов давлением в большинстве случаев используют безразмерные инвариантные показатели напряженного состояния [1-4].

Целью работы является исследование влияния немонотонности нагружения на величину предельной деформации для случая, когда немонотонность обусловлена изломом двухзвенной траектории нагружения.

На основании анализа современного состояния проблемы оценки пластичности металлов при немонотонном нагружении можно сделать вывод, что закономерности процессов накопления повреждений при таком деформировании сложны и их точное описание затруднительно [1 – 4, 6, 7]. Простейший вариант теории накопления повреждений при пластической деформации металлов строится в предположении, что этот процесс имеет направленный характер и может быть описан тензором второго ранга. При этом не исключается, что поврежденность можно описать скаляром, который может быть построен на основе такого тензора. При немонотонном нагружении наиболее достоверные результаты получаются при описании процесса накопления повреждений тензором второго ранга, компоненты которого определяются выражением [6, 7]

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u^*} F(\eta, \mu_\sigma, e_u) \beta_{ij} de_u, \quad (2)$$

где $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u}$ - компоненты направляющего тензора, (3)

$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}$ - показатель жесткости напряженного состояния,

$\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\sigma_{ij}$ - среднее напряжение,

σ_u – интенсивность напряжений,

μ_σ - параметр Надаи-Лоде,

Так как

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \frac{de_u}{\sigma_u} S_{ij}, \quad (4)$$

то из (3) и (4) следует, что

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{S_{ij}}{\sigma_u}, \quad (5)$$

где S_{ij} - компоненты девиатора напряжений.

Используем известные соотношения

$$\mu_\sigma = \frac{2S_2 - S_1 - S_3}{S_1 - S_3}, \quad (6)$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 0, \quad (7)$$

$$2\sigma_u^2 = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2, \quad (8)$$

После решения системы уравнений (6) - (8) с учетом (5), находим, что главные компоненты тензора β_{ij} равны

$$\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \beta_2 = -\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad \beta_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad (9)$$

Тензор Ψ_{ij} является девиатором [6]. Поэтому первый инвариант этого тензора равен нулю. Без учета влияния третьего инварианта условие разрушения можно записать в виде

$$\psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2 = 1, \quad (10)$$

Чтобы определить вид функции $F(e_u, \eta, \mu_\sigma)$, которая входит в (1), рассмотрим простое нагружение, при котором β_{ij} , η , μ_σ остаются постоянными, тогда [5]

$$\psi_{ij} = \beta_{ij} \int_0^{e_u^*} F(e_u, \eta, \mu_\sigma) de_u = \beta_{ij} \varphi(e_u, \eta, \mu_\sigma), \quad (11)$$

Так как $\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 = 1$, из (10) вытекает, что при разрушении, если $e_u = e_p$, $\varphi(e_p, \eta, \mu_\sigma) = 1$. Кроме того $\varphi(0, \eta, \mu_\sigma) = 0$.

Удовлетворяя этим условиям, предположим, что [5]

$$\varphi = \sum_{k=1}^m b_k \left(\frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right)^{n_k}, \quad \sum b_k = 1, \quad n_k > 0. \quad (12)$$

В соответствии с (11) и (12) примем в дальнейшем

$$\varphi = (1-a) \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} + a \frac{e_u^2}{e_p^2}, \quad (13)$$

где $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхность предельных деформаций,

a – постоянная, которая зависит от механических характеристик металла. В данной работе a принято равным $a = 0,48$.

Учитывая (2), (11) и (13) для главных компонент тензора повреждений получим выражения

$$\begin{aligned}\psi_1 &= \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_1 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \\ \psi_2 &= \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_2 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \\ \psi_3 &= \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_3 \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}\end{aligned}\quad (14)$$

Если при пластической деформации материал не достиг предельного состояния, то величина использованного ресурса пластичности будет равна

$$\psi = \psi_1^2 + \psi_2^2 + \psi_3^2, \quad (15)$$

В качестве примера немонотонного нагружения рассмотрим опыты на кручение с последующим растяжением и опыты на кручение с последующим совместным кручением и растяжением, которые можно представить двухзвенными траекториями нагружения в координатах $\sqrt{3}\tau_{z\theta}$ и σ_z (рис. 1). Угол α , который характеризует величину излома траектории в опытах на кручение и последующее растяжение равняется $\pi/2$ ($\alpha=\pi/2$) и изменяется от $\alpha=\pi/2$ до $\alpha=0$ в опытах, когда после деформации кручения реализуется совместное кручение с растяжением по программе, которая обеспечивает в пространстве $\sqrt{3}\tau_{z\theta}$ и σ_z прямолинейную траекторию АВ.

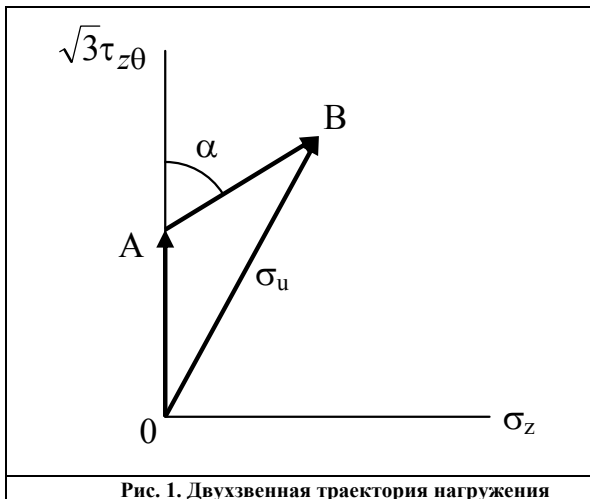


Рис. 1. Двухзвенная траектория нагружения

функцией полученной в работе [8]

Интенсивность напряжений в этом случае будет равняться

$$\sigma_u = \sqrt{3\tau_{z\theta}^2 + l^2 + 2\sqrt{3}\tau_{z\theta}l \cos \alpha}, \quad (16)$$

где принято, что длина вектора АВ=l.

Главные напряжения рассчитывали по формуле

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau_{z\theta}^2}. \quad (17)$$

В данной работе выполнены расчеты зависимости предельной деформации e_p от величины угла излома траектории α и от величины степени деформации на первом этапе деформирования. Расчеты выполнены для стали 10, кривую течения которой аппроксимировали зависимостью

$$\sigma_u = 208(1 + 100e_u)^{0,29}, \quad (18)$$

а поверхность предельных деформаций описывали

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0,68 \exp(0,43\mu_\sigma - 0,91\eta). \quad (19)$$

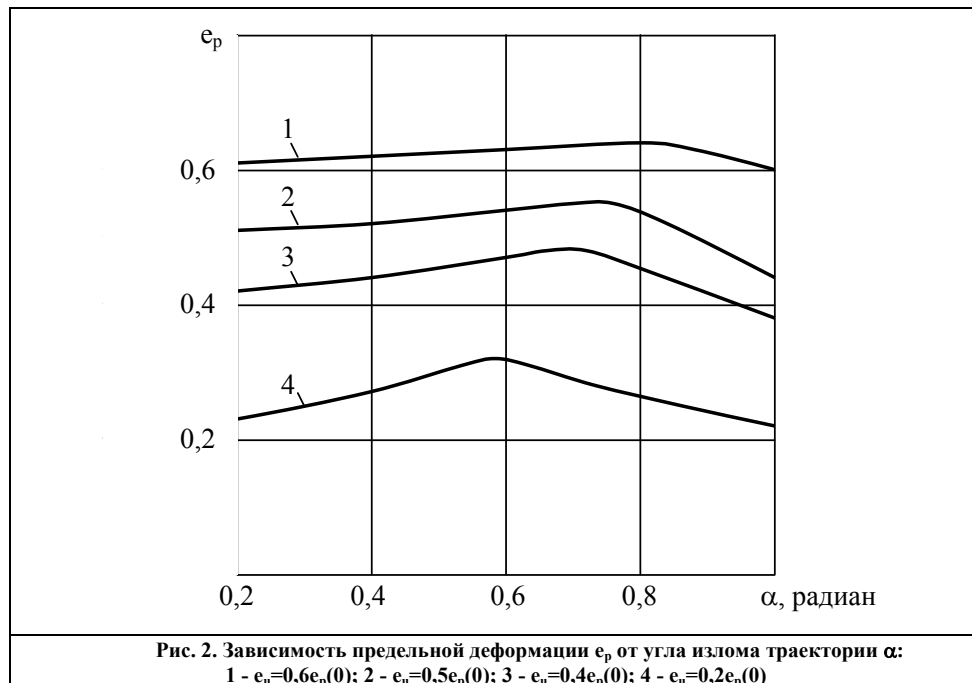
На каждом этапе до и после излома траектории нагружения величину использованного ресурса пластичности рассчитывали по формуле (15), а предельную деформацию находили из условия, что суммарное значение использованного ресурса пластичности за два этапа равняется единице. При этом на каждом этапе главные компоненты направляющего тензора β_{ij} рассчитывали по формулам (9). Для расчета μ_σ использовали выражения (6) и (17). Компоненты тензора повреждений на каждом этапе рассчитывали по соотношениям (14). Степень деформации e_u рассчитывали по формуле (1), интенсивность напряжений находили по кривой течения, а показатель напряженного состояния η определяли по формуле

$$\eta = \frac{\sigma_z}{\sigma_u}. \quad (20)$$

Расчеты выполнены для случаев, когда степень деформации e_u на первом этапе деформирования равнялась $e_u = 0,2$, $e_u = 0,4$, $e_u = 0,5$ и $e_u = 0,6$. Предельная деформация для стали 10 при кручении принята равной $e_p(0)=0,68$. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 2 следует, что предельная деформация увеличивается при изменении угла излома траектории α от значений $\alpha=0$ до $\alpha=(0,6...0,8)$ радиан. Значения α , при которых имеет место максимум на кривых $e_p(\alpha)$ тем меньше, чем меньше величина степени деформации перед изломом траектории. Увеличение предельной деформации после излома траектории нагружения свидетельствует о том, что

немонотонность нагружения обусловленная этим изломом, приводит к уменьшению интенсивности накопления повреждений, хотя после излома траектории появляются растягивающие напряжения.



Выводы.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при немонотонном нагружении обусловленном изломом двухзвенной траектории нагружения, величина предельной деформации увеличивается с увеличением угла излома траектории α от значений $\alpha=0$ до $\alpha=(0,6-0,8)$ радиан. Установлено, что при любом значении степени деформации перед изломом траектории нагружения всегда существует такой угол излома, при котором величина предельной деформации принимает максимальное значения.

Список литературы

1. Богатов А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М.: Metallurgy, 1984. – 144 с.
2. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. - М: Metallurgy, 1970. – 229 с.
3. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. - М.: Машиностроение, 1978. - 174 с.
4. Огородников В.А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В.А. Огородников, В.Б. Киселёв, И.О. Сивак – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
5. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А. А. Ильюшин. – М.: АН СССР, 1963. – 271 с.
6. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла / Г.Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. - 1982.- №11. - С. 28-32.
7. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 195 с.
8. Сивак И.О. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с контурной осадкой / И.О. Сивак, Р.И. Сивак, И.С. Алиев // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ. – 2000. – С. 278 - 284.