

УДК 621.73.011

Сивак¹ Р.И., к.т.н., доц.; Огородников² В.А., д.т.н., проф.; Сивак² И.О., д.т.н., проф.

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

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

ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОМ ДВУХЭТАПНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Sivak¹ R., Ogorodnikov² V., Sivak² I.

1-Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine; 2-Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

EVALUATION OF METAL PLASTICITY BY COLD TWO-STAGE DEFORMATION

В работе выполнены исследования влияния анизотропии механических свойств и величины использованного ресурса пластичности, обусловленных предшествующей пластической деформацией металла, на его пластичность при последующей пластической деформации в заданном направлении. При этом использована тензорная модель процесса накопления повреждений, в основе, которой лежит гипотезе о зависимости интенсивности накопления повреждений от чувствительности пластичности металла к схеме напряжённого состояния, которая описывается поверхностью предельных деформаций, от истории деформирования и направляющего тензора приращений пластических деформаций. Результаты выполненных в работе экспериментальных исследований подтвердили достоверность принятой модели процесса накопления повреждений.

Ключевые слова: степень деформации, диаграмма пластичности, траектории деформирования, тензор повреждений, ресурс пластичности.

Введение. Феноменологическая теория разрушения базируется на сложившихся в настоящее время представлениях о закономерностях накопления повреждений в зависимости от условий, в которых протекает пластическая деформация. В работах [1-4] показано, что интенсивность накопления повреждений может быть существенно снижена изменением характера формоизменения, например, немонотонным нагружением.

В последнее время много внимания уделяется проблеме прогнозирования технологического наследия изделий, полученных методами пластического деформирования [5, 6]. Так как напряжённо-деформированное состояние, обусловленное условиями работы детали, неоднородно, то представляет интерес вопрос оценки пластичности металла детали в наиболее опасном, с точки зрения напряжений и деформаций, направлении [7].

В работах [4, 7] рассмотрены модели накопления повреждений и методы оценки пластичности металлов при немонотонном нагружении. Однако недостаточно внимания уделено экспериментальным исследованиям достоверности принятых моделей накопления повреждений для оценки влияния анизотропии механических свойств, обусловленных предыдущей пластической деформацией, на пластичность металла при его последующем деформировании в заданном направлении.

В данной работе выполнены исследования пластичности деформированного металла в выбранном направлении, в зависимости от величины использованного ресурса пластичности на предыдущем этапе пластического формоизменения. Для проверки достоверности принятых моделей накопления повреждений, выполнены опыты на совместное кручение с растяжением по различным траекториям с последующим растяжением до разрушения.

Целью исследования является экспериментальная проверка тензорной модели процесса накопления повреждений при оценке пластичности деформированного металла.

Исследование.

В общем случае сложного нагружения при оценке пластичности металлов наиболее достоверные результаты получаются при использовании условия разрушения предложенного Г. Д. Делем [7]

$$\Psi_{ij} \Psi_{ij} = 1, \quad (1)$$

где $\Psi_{ij} = \int_0^{e_u} F(e_u^*, \eta, \mu_\sigma) \beta_{ij} de_u^*$ - компоненты тензора повреждений,

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

$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}$ - показатель напряжённого состояния, μ_σ - параметр Надаи-Лоде,

$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau$ - степень деформации.

При расчётах использованного ресурса пластичности ψ по условию разрушения (1) для функции повреждений

$$\phi(e_u, \eta, \mu_\sigma) = \int_0^{e_u} F(e_u^*, \eta, \mu_\sigma) de_u^* \quad (3)$$

использовали аппроксимацию Г. Д. Деля [7]

$$\phi(e_u, \eta, \mu_\sigma) = (1-a) \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} + a \frac{e_u^2}{e_p(\eta, \mu_\sigma)^2} \quad (4)$$

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

Так как в опытах на совместное кручение с растяжением имеет место плоское напряжённое состояние и показатель η изменяется в пределах $0 \leq \eta \leq 1$, то зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния будет описываться диаграммой пластичности $e_p(\eta)$, которая является результатом пересечения поверхности предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ с поверхностью [8]

$$\eta = -\frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что поверхность (5) очень близка до плоскости $\eta = -\mu_\sigma$.

Поэтому в (4) вместо $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ использовали в дальнейшем диаграмму пластичности, которую аппроксимировали зависимостью [3]

$$e_p(\eta) = e_p(0) \exp(-\lambda \eta), \quad (6)$$

где $\lambda = \ln \frac{e_p(0)}{e_p(1)}$, $e_p(0)$, $e_p(1)$ – предельные деформации при $\eta=0$ и $\eta=1$, соответственно.

В работе [4] отмечается, что количественное соответствие между расчётными и экспериментальными данными можно улучшить удачным выбором функции ϕ и что различных аппроксимаций ϕ может быть много. Однако каждая из них должна удовлетворять требованиям, приведённым в работе [7].

Из (1), (2) и (3) следует, что

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^*}{e_p} \right) \beta_{ij} \frac{de_u^*}{e_p}. \quad (7)$$

В опытах на совместное кручение с растяжением

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{11} = -2d\varepsilon_{22} = -2d\varepsilon_{33} = d\varepsilon_x; \quad d\varepsilon_{12} = \frac{d\gamma}{2} \\ d\varepsilon_{13} = d\varepsilon_{23} = 0; \quad d\varepsilon_u = \sqrt{d\varepsilon_x^2 + \frac{1}{3}d\gamma^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из соотношений теории течения

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_u}{\sigma_u} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)$$

следует, что

$$\eta = \frac{d\varepsilon_x}{d\varepsilon_u}. \quad (9)$$

Для опытов на совместное кручение с растяжением с учётом (2), (8) и (9) будут справедливы соотношения

$$\beta_{11} = -2\beta_{22} = -2\beta_{33} = \sqrt{\frac{2}{3}}\eta, \quad (10)$$

$$\beta_{12} = \sqrt{\frac{1-\eta^2}{2}} \quad (11)$$

Условие разрушения (1) в опытах на совместное кручение с растяжением запишется в виде [7]

$$\psi^2 = \psi_{ij}\psi_{ij} = \frac{3}{2}\psi_{11}^2 + 2\psi_{12}^2 = 1. \quad (12)$$

При получении (12) учтено, что согласно (1) и (10)

$$\psi_{22} = \psi_{33} = -\frac{\psi_{11}}{2}. \quad (13)$$

Из соотношений (7), (10), (11) и (12) находим, что в опытах на совместное кручение с растяжением использованный ресурс пластичности определяется формулой

$$\psi = \sqrt{\left[\int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^*(\eta)}{e_p(\eta)} \right) \eta \frac{de_u}{e_p} \right]^2 + \left[\int_0^{e_u} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^*(\eta)}{e_p(\eta)} \right) \sqrt{1-\eta^2} \frac{de_u^*}{e_p} \right]^2}. \quad (14)$$

Опыты на совместное кручение с растяжением проводили на образцах из стали Р6М5. Выбор такого материала обусловлен тем, что при разрушении образцов из этой стали не образуется шейка. Программы деформирования задавали траекториями

$$\eta = be_u, \quad (15)$$

где $b=1,40, 2,25$ и $3,20$.

Диаграммы пластичности стали Р6М5 и траектории деформирования (15) приведены на рис.1. Предельную деформацию e'_p при деформировании по траекториям (15) находили по (14) из условия, что при $\psi=1$ степень деформации e_u равна предельной e'_p . Расхождение между экспериментальными и рассчитанными по (14) значениями e'_p не превышает 10%.

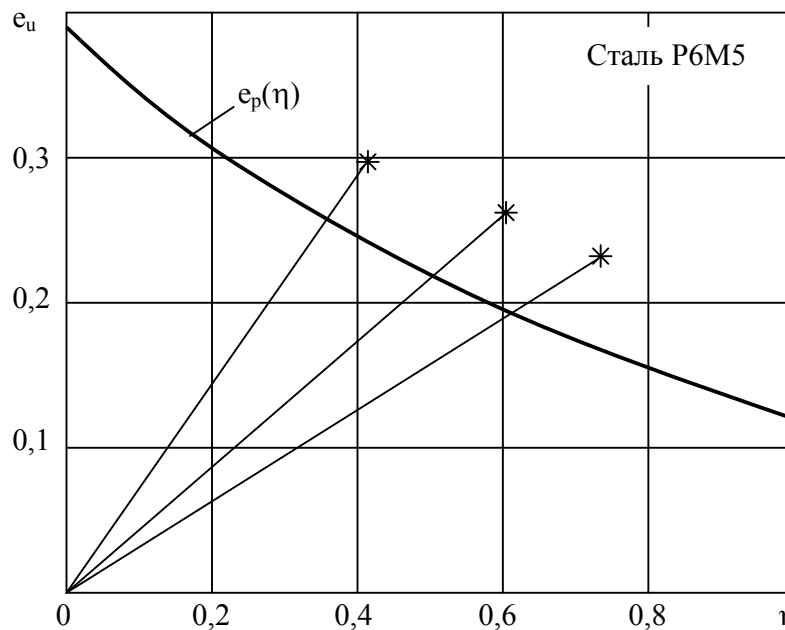


Рис. 1. Диаграммы пластичности и траектории деформирования (15) образцов из стали Р6М5 (* - разрушение при сложном нагружении)

В данной работе при деформировании образцов по траекториям (15) часть образцов не доводили до разрушения, а деформировали до степеней деформации e_u^0 , при которых использованный ресурс пластичности ψ , рассчитанный по формуле (14) составил $\psi=0,40...0,45$ или $\psi=0,75...0,80$. В дальнейшем эти образцы растягивали до разрушения и определяли величину предельной остаточной деформации e_p^{ocm} (1).

При этом оказалось, что при растяжении образцов продеформированных на первом этапе до значений $\psi=0,40\dots0,45$ остаточная деформация $e_p^{ocm}(1)$ отличалась от предельной деформации $e_p(1)$, полученной при растяжении до разрушения образцов в исходном состоянии, на 10...12%.

При последующем растяжении до разрушения образцов, продеформированных на первом этапе до значений $\psi=0,75\dots0,80$ значение деформации $e_p^{ocm}(1)$ оказалось меньше $e_p(1)$ на 65...70%.

Такие результаты свидетельствуют о том, что при $\psi \geq 0,8$ в металле накапливаются повреждения, которые практически не заживают и при немономтонном нагружении.

Необходимо отметить, что если бы просто реализовать опыты на растяжение в два этапа, то при $\psi=0,40\dots0,45$ на первом этапе значение предельной деформации $e_p^{ocm}(1)$ на втором этапе было бы меньше от $e_p(1)$ на 40...45%, аналогично при повторном растяжении образцов до $\psi=0,75\dots0,80$ $e_p^{ocm}(1)$ оказалось бы меньше $e_p(1)$ на 75...80%.

В работе [7] показано, что если известны компоненты тензора повреждений ψ_{ij} в системе координат, ось которой x_1 , совпадает с направлением, в котором будет реализована деформация растяжения, то компоненты тензора ψ_{ij} изменятся на величину

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{11} = -2\Delta\psi_{22} = -2\Delta\psi_{33} &= \int_{e_u^0}^{e_u^0 + e_p^{ocm}} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^0}{e_p(1)} \right) \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{de_u}{e_p(1)} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{e_p^{ocm}(1)}{e_p(1)} \left(1 - a + 2a \frac{e_u^0}{e_p(1)} \right) + a \left(\frac{e_p^{ocm}(1)}{e_p(1)} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (16)$$

где e_u^0 – степень деформации в исследуемой точке после предшествующей деформации,

$e_p(1)$ – предельная деформация недеформированного металла при растяжении.

При получении выражения (16) учтены соотношения (2), (7) и (13).

Из условия разрушения

$$(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij})(\psi_{ij} + \Delta\psi_{ij}) = 1$$

следует, что

$$\Delta\psi_{11} = -\psi_{11} + \sqrt{\psi_{11}^2 + \frac{2}{3}(1 - \psi_{ij}\psi_{ij})}. \quad (17)$$

Из совместного решения (16) и (17) находим величину предельной остаточной деформации $e_p^{ocm}(1)$

$$e_p^{ocm}(1) = e_p(1) \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2a} - \frac{e_u^0}{e_p(1)} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2a} - \frac{e_u^0}{e_p(1)} \right)^2 - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\psi_{11}}{a} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\psi_{11}^2}{a^2} + \frac{1}{a^2}(1 - \psi_{ij}\psi_{ij})} \right] \quad (18)$$

При расчёте $e_p^{ocm}(1)$ по формуле (18) принимали $a=0,5$ [7].

Расчётные значения $e_p^{ocm}(1)$, полученные по формуле (18) отличаются от соответствующих экспериментальных значений на 7...9%. Это свидетельствует о том, что тензорная модель процесса накопления повреждений может быть использована для определения остаточной пластичности деформированного металла в заданном направлении.

Вывод

На основании выполненных экспериментальных исследований остаточной пластичности материала предварительно деформированных образцов, обоснована достоверность тензорной модели накопления повреждений при оценке пластичности деформированного металла.

Анотація. В роботі виконані дослідження впливу анізотропії механічних властивостей і величини використаного ресурсу пластичності, обумовлених попередньою пластичною деформацією металу, на його пластичність при подальшій пластичній деформації в заданому напрямку. При цьому використана тензорна модель процесу накопичення пошкоджень, в основі якої лежить гіпотеза про залежність інтенсивності накопичення пошкоджень від чутливості пластичності металу до схеми напруженого стану, яка описується поверхнею граничних деформацій, від історії деформування і направляючого тензора прирощень пластичних деформацій. Результати виконаних в роботі експериментальних досліджень підтвердили достовірність прийнятої моделі процесу накопичення пошкоджень.

Ключові слова: ступінь деформації, діаграма пластичності, траєкторії деформування, тензор пошкоджень, ресурс пластичності.

Abstract. Subject. *Plasticity of deformed metal depending on the amount of used resource of ductility at the previous stage of forming and deformation story at the subsequent stage.*

Subject-matter: *Evaluation of ductility of deformed metal and its dependence on the size and nature of the preliminary plastic deformation.*

Purpose of the study is to test the reliability adopted in the tensor model of damage accumulation in the evaluation of plasticity deformed metal.

To evaluate the plasticity of the metal is used strain tensor model of damage accumulation process, which is based on the hypothesis of the dependence of the damage accumulation intensity on the plasticity sensitivity the of the metal to the scheme stressed state, which is described by limiting the surface deformation of the deformation story and by guiding the plastic strain increment tensor.

The experiments are carried out on a joint twisting stretch of solid cylindrical sample to a certain degree of deformation and subsequent stretching before breaking. Experiments on joint twisting stretch were carried out by a special program that provides complex loading. The difference between ultimate strain calculated from the accepted model and obtained in experimental studies does not exceed 9%.

Application results. Tensor model of damage accumulation, adopted in this paper, can be used to assess the estimated longevity of parts made of metal forming techniques, depending on the features of plastic deformation in their manufacture and the stress-strain state, which will take place during the details operation.

Findings. On the basis of experimental studies performed residual plasticity of the material pre-deformed specimens, was proved the accuracy of the tensor model of damage accumulation in the evaluation of deformed metal plasticity.

Keywords: degree of deformation, the diagram of plasticity, deformation path tensor damage, plasticity resource.

References

1. Bogatov, A.A., Bogatov, A.A., Mizhiritskiy, O.I. and Smirnov, S.V. (1984), *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem*, Metallurgia, Moscow, Russia.
2. Del, G.D. (1978), *Tehnologicheskai mehanika*, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
3. Ogorodnikov, V.A. (1989), *Deformiruemost i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii*, UMKVO, Kyiv, Ukraine.
4. Mihalevich, V.M. (1998), *Tenzorni modeli nakopichennia poshkodzen*, UNIVERSUM, Vinnitsia, Ukraine.
5. Ogorodnikov, V.A., Kiselev, V.B. and Sivak, I.O. (2005), *Energia, Deformatsii, Razrushenie (zadachi avtotekhnicheskoi ekspertizy)*, UNIVERSUM, Vinnitsia, Ukraine.
6. Aliev, I.S. (1998), "Tehnologicheskie protsessy holodnogo poperechnogo vydavlivania", *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo* no 6, pp.1-4.
7. Del, G.D. (1983), "Plastichnost deformirovannogo metalla", *Phizika i tehnika vysokih davleni*, no 11. pp. 28-32.
8. Burennikov, Iu.A., Sivak, I.O. and Sivak, E.I. (2003), "Zavisimost plastichnosti ot shemi napriazhennogo sostoiania pri ploskom napriazhennom sostoianii", *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni*. pp. 272-274.

Подана до редакції 09.29.2016