

Н.И. Бобырь¹ д-р.техн.наук, проф., Б.О. Яхно¹ канд.техн.наук,
Евгений Русински² д-р.техн.наук, проф.

1–НТУ України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна;

2–Вроцлавський технічний університет, Вроцлав, Польща.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16Т ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ.

В работе проведено исследование гиперповерхности пластичности для сплава Д16Т при различных видах нагружения. Определены основные параметры поверхности и ее энергетические характеристики, показана связь между накопленными повреждениями в материале и изменением гиперповерхности пластичности.

In the article was shown hyper elasticity surface for aluminum alloy D16T investigation in the case of tension, torsion and complex stress-strain state. Was discussed hyper elasticity surface main parameters and it's energetical equivalent. Also was shown connection between damage and hyper elasticity surface deformation.

Процесс упруго-пластического деформирования сопровождается зарождением, ростом и аккумуляцией рассеянных микрповреждений в конструкционном материале. Рост микрповреждений приводит не только к деградации механических свойств материала но и к накоплению остаточных дополнительных напряжений, которые в свою очередь влияют на изменение предела текучести.

Авторами [1, 2] было предложено выбрать переменную повреждаемости в следующем виде:

$$D = 1 - \frac{E_0}{E_i}, \quad (1)$$

где E_0 - модуль упругости для неповрежденного материала в начале упруго-пластического деформирования, E_i - текущий модуль упругости.

Влияние остаточных микронапряжений на предел текучести во многом обуславливается эффектом Баушингера. На сегодняшний момент времени не существует однозначного определения этого эффекта. Например, авторами было предложено в качестве величины, описывающей эффект Баушингера, ввести величину α :

$$\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\sigma - \sigma_y^-}{\sigma} \quad (2)$$

где σ - текущее значение напряжения, σ_y^- - предел упругости в случае сжатия.

В публикациях [3] была предложена следующее выражение для величины α :

$$\alpha = \left| \frac{\sigma_{y0} - \sigma_y}{\sigma_{y0}} \right| \quad (3)$$

где σ_{y0} - начальное значение предела упругости, σ_y - текущее значение предела упругости.

Авторами [4-5] было показано, что эффект Баушингера может быть описан разностью пределов упругости при растяжении и сжатии:

$$\alpha = \Delta\sigma_y = \sigma_y^+ - \sigma_y^- \quad (4)$$

где σ_y^+ и σ_y^- - текущие значения предела упругости для растяжения и сжатия соответственно.

Переходя к рассмотрению гиперповерхности пластичности авторами [6-8] показано, что эффект Баушингера может быть описан как величина перемещения центра гиперповерхности пластичности, при этом уравнение для гиперповерхности пластичности приводится в следующем виде:

$$\frac{1}{2}(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) = R^2 \quad (5)$$

где S_{ij} - девиатор напряжений, α_{ij} - перемещение центра гиперповерхности пластичности, R - радиус гиперповерхности пластичности.

В общем случае уравнение для гиперповерхности пластичности может быть записано в следующем виде:

$$F(\sigma_{ij}) = 0 \quad (6)$$

Деформирование гиперповерхности пластичности в случае плоского упруго-пластического нагружения приведено на рис.1 При этом перемещение центра поверхности выражено величиной α , а изменение радиуса ΔR .

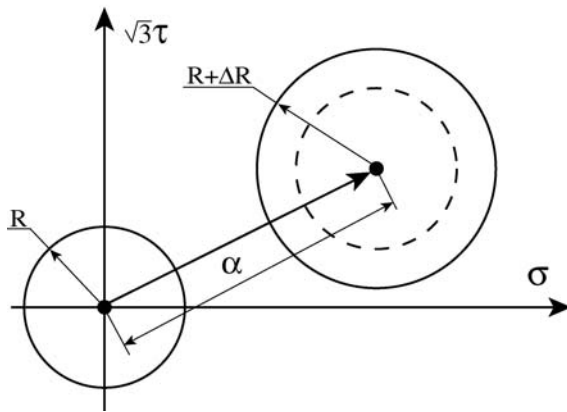


Рис.1. Изменение гиперповерхности пластичности в ходе упруго-пластического деформирования.

Рассмотрим случай квази-статического одноосного растяжения-сжатия. В этом случае предел упругости для неповрежденного материала может быть записан в следующем виде:

$$\sigma_{y_0}^+ = R \quad (7)$$

$$\sigma_{y_0}^- = -R \quad (8)$$

После упруго-пластического деформирования предел упругости материала можно записать в следующей форме:

$$\sigma_{y_i}^+ = \alpha + (R + \Delta R) \quad (9)$$

$$\sigma_{y_i}^- = \alpha - (R + \Delta R) \quad (10)$$

Изменение предела упругости при растяжении можно записать в виде:

$$\Delta\sigma_y^+ = \sigma_{y_i}^+ - \sigma_{y_0}^+ = \alpha + \Delta R \quad (11)$$

Аналогично для сжатия:

$$\Delta\sigma_y^- = \sigma_{y_i}^- - \sigma_{y_0}^- = \alpha - \Delta R \quad (12)$$

Введем в рассмотрение величины ρ и r :

$$\rho = \Delta\sigma_y^+ + \Delta\sigma_y^- = \alpha + \Delta R + \alpha - \Delta R = 2\alpha \quad (13)$$

$$r = \Delta\sigma_y^+ - \Delta\sigma_y^- = \alpha + \Delta R - (\alpha - \Delta R) = 2\Delta R \quad (14)$$

Значение дополнительных напряжений ρ и r для алюминиевого сплава Д16Т в случае растяжения-сжатия показано на рис.2.

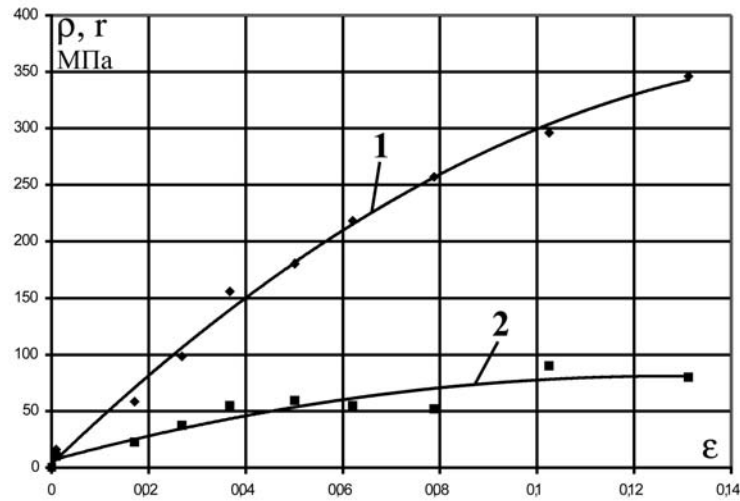


Рис.2. Параметры гиперповерхности упругости для алюминиевого сплава Д16Т в ходе упруго-пластического деформирования: 1 – значение напряжений ρ , 2 – значение напряжений r .

Как было показано в публикациях [9] величина ρ может быть записана в следующем виде:

$$\rho \approx 2\sigma_{true} \frac{D}{1-D} \quad (15)$$

где σ_{true} - истинное значение напряжений, D - переменная повреждаемости, тогда

$$\alpha = \sigma_{true} \frac{D}{1-D}. \quad (16)$$

Механическая энергия конструкционного материала может быть определена как площадь под кривой упруго-пластического деформирования. Часть такой диаграммы показано на рис.3.

Упругая энергия S_0^+ неповрежденного материала может быть записана в следующем виде:

$$S_0^+ = \frac{1}{2} \sigma_{y_0}^+ \cdot \varepsilon_{y_0} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_{y_0}^+)^2}{E_0} - \text{для растяжения,} \quad (17)$$

$$S_0^- = \frac{1}{2} \sigma_{y_0}^- \cdot \varepsilon_{y_0} = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_{y_0}^-)^2}{E_0^-} - \text{для сжатия.} \quad (18)$$

Тогда для материала, подвергнутому упруго-пластическому деформированию

$$S_i^+ = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_{y_i}^+)^2}{E_i} - \text{для растяжения,} \quad (19)$$

$$S_i^- = \frac{1}{2} \frac{(\sigma_{y_i}^-)^2}{E_y^-} - \text{для сжатия.} \quad (20)$$

Изменение предела текучести (Рис.3) может быть записано в следующем виде:

$$\Delta S^+ = S_i^+ - S_0^+ = \frac{1}{2E_0^+} \cdot \frac{D}{1-D} \cdot \left(\frac{2\sigma_{y_0}^+ \cdot \sigma_{true}}{1-D} + \frac{\sigma_{true}^2 D}{(1-D)^2} + (\sigma_{y_0}^+)^2 \right) \quad (21)$$

$$\Delta S^- = S_i^- - S_0^- = \frac{1}{2E_0^-} \cdot \frac{D}{1-D} \cdot \left(\frac{2\sigma_{y_0}^- \cdot \sigma_{true}}{1-D} + \frac{\sigma_{true}^2 D}{(1-D)^2} + (\sigma_{y_0}^-)^2 \right) \quad (22)$$

Полный прирост упругой энергии может быть записан в следующей форме:

$$\Delta S = \Delta S^+ + \Delta S^- \quad (23)$$

Прирост энергии напряжений ρ показана на рисунке 2 как $\Delta\Psi^+$ и $\Delta\Psi^-$. Полное значение энергии Ψ может быть записано в следующем виде:

$$\Psi = \Delta\Psi^+ + \Delta\Psi^- = \int_0^{\varepsilon_{pi}} \rho d\varepsilon_p \quad (24)$$

А энергию напряжений r возможно записать как следующий интеграл:

$$\Phi = \int_0^{\varepsilon_{pi}} r d\varepsilon_p \quad (25)$$

Действительные значения энергий Ψ , Φ , ΔS для алюминиевого сплава Д16Т показано на рис.4.

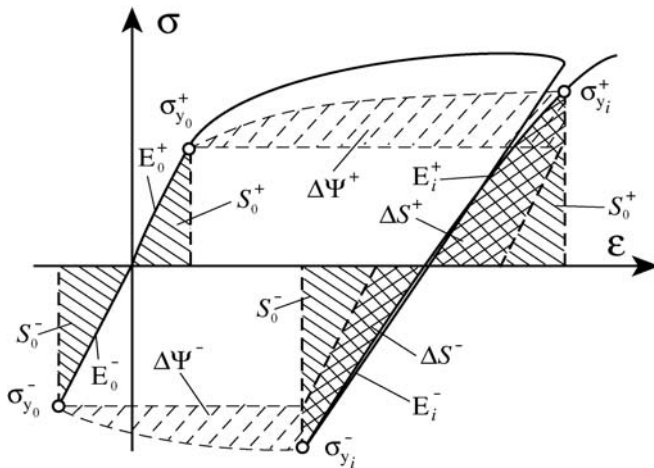


Рис. 3 Диаграмма упруго-пластического деформирования.

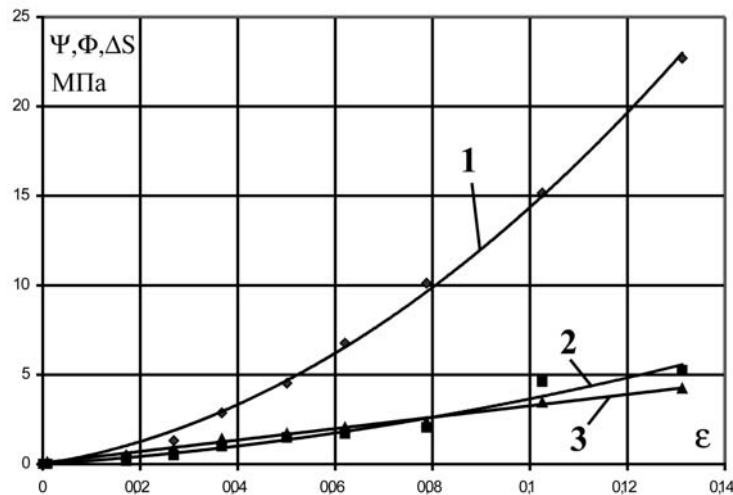


Рис. 4. Энергетические параметры гиперповерхности пластичности для сплава Д16Т при растяжении-сжатии: 1 - Ψ , 2 - Φ , 3 - ΔS .

Анализируя данные с рис.4 можно прийти к выводу, что в первом приближении для случая растяжения-сжатия $\Phi \approx \Delta S$. Это дает возможность считать, что в случае растяжения-сжатия для сплава Д16Т изменение радиуса гиперповерхности пластичности эквивалентно изменению упругой энергии материала.

В случае квазистатического кручения значительное изменение радиуса r было не значительно (рис.5), при этом перемещение центра поверхности α имело место.

На рисунке 6 приведены энергетические характеристики гиперповерхности пластичности, при этом можно также наблюдать близость значений упругой энергии ΔS и энергии Φ .

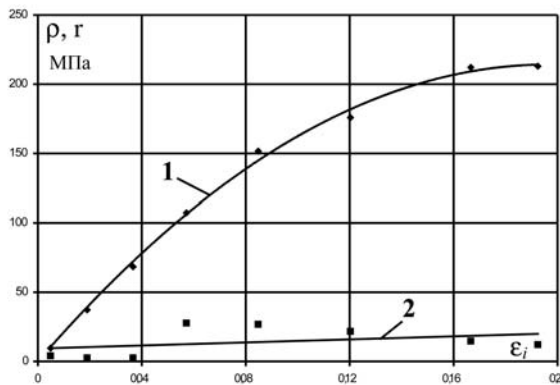


Рис.5 Параметры гиперповерхности упругости для алюминиевого сплава Д16Т в ходе упруго-пластического кручения: 1 – значение напряжений ρ , 2 – значение напряжений r , $\varepsilon_i = \gamma/\sqrt{3}$.

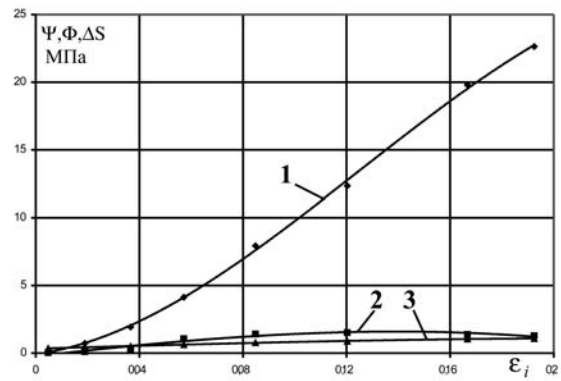


Рис.6 . Энергетические параметры гиперповерхности текучести для сплава Д16Т в случае статического кручения: 1 - Ψ , 2 - Φ , 3 - ΔS .

В случае сложного квазистатического непропорционального нагружения (схема нагружения приведена на рис.7), целесообразно рассматривать величины смещения центра гиперповерхности пластичности и увеличения радиуса в следующем виде:

$$\rho_i = \sqrt{\rho_\sigma^2 + 3\rho_\tau^2} \quad (26)$$

$$r_i = \sqrt{r_\sigma^2 + 3r_\tau^2} \quad (27)$$

где ρ_σ , r_σ - величины смещения центра гиперповерхности пластичности и увеличения радиуса при растяжении-сжатии, а ρ_τ , r_τ - соответственно при кручении.

Тогда выражения для энергий примут следующий вид:

$$\Psi = \Psi_\sigma + \Psi_\tau \quad (28)$$

$$\Phi = \Phi_\sigma + \Phi_\tau \quad (29)$$

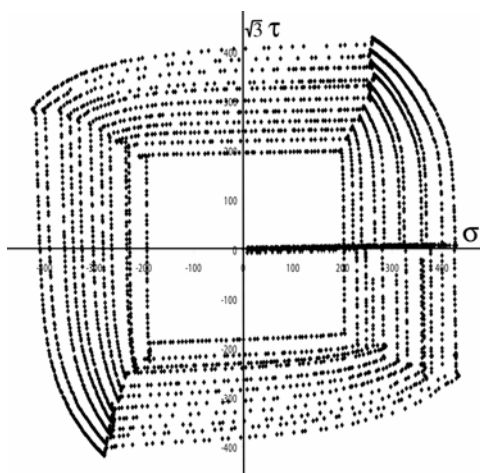


Рис.7. Ступенчатое квазистатическое нагружение по квадратной траектории

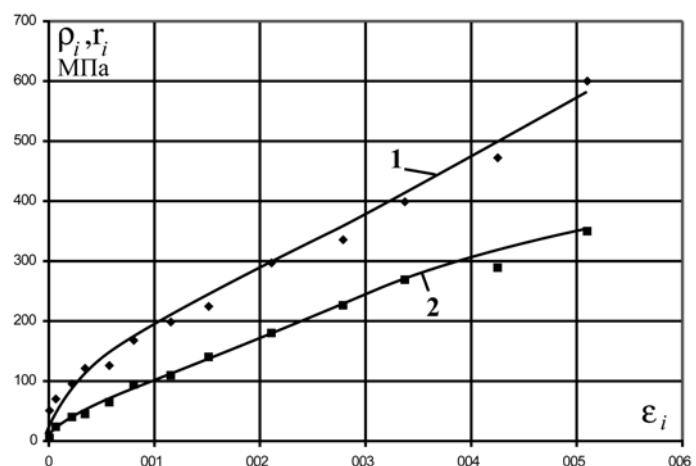


Рис.8. Параметры гиперповерхности упругости для алюминиевого сплава Д16Т в ходе упруго-пластического кручения: 1 – значение напряжений ρ_i , 2 – значение напряжений r_i , $\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2}/3$.

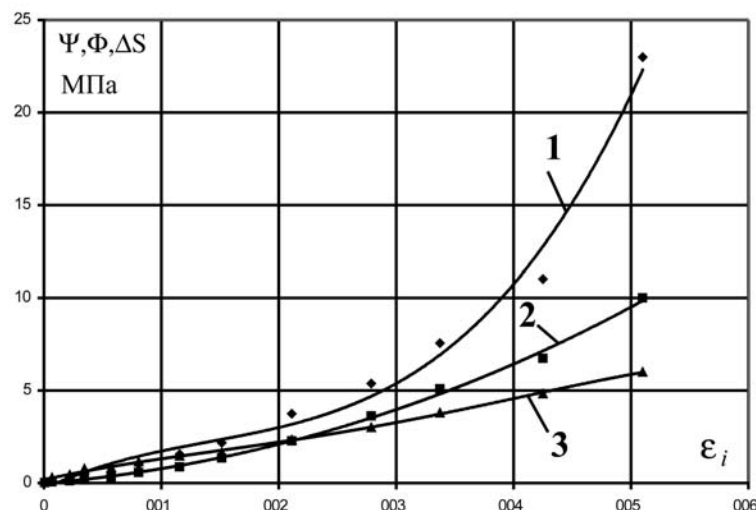


Рис.9. Энергетические параметры гиперповерхности текучести для сплава Д16Т в случае сложного непропорционального квазистатического ступенчатого нагружения: 1 - Ψ , 2 - Φ , 3 - ΔS .

Из проведенных выше исследований можно сделать следующие выводы: процесс деформирования гиперповерхности пластичности имеет нелинейный характер, при этом смещение центра поверхности имеет место для сплава Д16Т при любом виде нагружения, при этом изменение радиуса поверхности наиболее сильно проявляется при растяжении-сжатии и сложном напряженном состоянии, в то время как при чистом кручении он выражен не так сильно. Из приведенных на рис. 4, 6, 9 данных видно, что изменение упругой энергии материала связано с изменением радиуса гиперповерхности пластичности и в первом приближении можно говорить об идентичности прироста упругой энергии и прироста энергии, связанной с изменением радиуса гиперповерхности пластичности.

Список литературы

1. Lemetr J. A Course on Damage Mechanics. – Springer Verlag., Germany., 1992. – 210 p.
2. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.:Наука., 1974. – 312 с.
3. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях.- М.: Изд. МГУ., 1965. – 262 с.
4. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении – М.:Наука., 1988. – 279 с.
5. Романов А.Н., Гаденин М.М. Методы определения циклического эффекта Баушингера.// Заводская лаборатория. – 1972.- №1.- С.99-102.
6. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение., 1990. – 223 с.
7. Талыпов Г.Б.. Анализ экспериментальных данных по эффекту Баушингера и их теоретическое истолкование.// Механика твердого тела. – 1966. – №2. – С.108-115.
8. Шевченко Ю.Н. Терехов Р.Г. Физические уравнения термо-вязкопластичности. – К.: Наукова думка., 1982. – 240 с.
9. Бобырь Н.И., Яхно Б.О., Грабовский А.П. Поврежденность конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении. // Проблемы прочности. – 2007. - №6. – С. 25-34.