

УДК 621.01:541

Сивак Р.І.,

Нахайчук О.В.

Огородніков В.А.

(Вінницький державний аграрний університет)

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ВІД ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБ'ЄМНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

В статье приведены результаты исследований пластичности металлов при объёмном напряжённом состоянии. При этом для оценки влияния схемы напряжённого состояния и истории нагружения на пластичность процесс нагружения рассматривается в пространстве трёх безразмерных инвариантных характеристик напряжённо-деформированного состояния. Предложены критерии деформируемости, в которых зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния и история нагружения задаются у выбранном трёхмерном пространстве.

In the article the results of researches of plasticity of metals are resulted at the by volume tense state. Thus for the estimation of influencing of chart of the dressed up state and history of loading on plasticity it is suggested to examine the process of loading in space of three dimensionless invariant descriptions of the tensely-deformed state. The criteria of deformed, in which dependence of plasticity on the chart of the tense state and history of loading is set at the chosen three-dimensional space, are offered.

Вступ

При виготовленні заготовок методами обробки металів тиском, особливо при освоєнні нових технологій, на поверхні або в середині деформуємого металу можуть виникати макротріщини. В таких випадках продукція вважається бракованою. Можливі також випадки, коли запас пластичності металу використовується недостатньо. Внаслідок чого мають місце значні виробничі витрати. Крім того, при розробці нових технологій не завжди відомі шляхи, як запобігти утворенню тріщин, а також ускладнена оцінка придатності даного технологічного процесу для виготовлення бездефектної продукції.

Постановка завдання

Для деяких видів продукції недопустиме створення навіть мікродефектів, оскільки це може призвести до погіршення експлуатаційних характеристик. В зв'язку з цим важливими є задачі дослідження кінетики пластичного розпушення, формування критерію макроруйнування металу та вибір на цій основі оптимальних умов процесу пластичного формозмінення. Тому актуальною залишається проблема розробки процесів обробки металів тиском, в яких не виникають порушення суцільності в матеріалі деформуємої заготовки.

Основна частина

Відомо, що пластична деформація металу супроводжується його розпушенням [1], яке можна оцінити залишковим відносним збільшенням об'єму. Так як зміна об'єму мала, то в практичних розрахунках використовувати значення пластичного розпушення як міру пластичності дуже важко. Крім того, задача ускладнюється тим, що експериментальні вимірювання зміни елементарних об'ємів в пластичній області дуже трудомісткі.

Тому, виходячи із припущення про існування зв'язку між пластичним розпушенням і накопиченою пластичною деформацією в якості міри пластичності, в більшості випадків, використовують накопичену до моменту руйнування пластичну деформацію [2, 3]

$$\epsilon_p = \int_0^{t_p} \dot{\epsilon}_u dt, \quad (1)$$

де $\dot{\epsilon}_u$ - інтенсивність швидкостей деформацій,
 t_p – час деформування до руйнування.

Відомо, що величина граничної деформації e_p залежить від виду напруженого стану. С.І. Губкін першим запропонував ідею побудови експериментальних залежностей, які відтворюють залежність пластичності даного металу від показника η , який характеризує напружений стан [4]

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad (2)$$

де $I_1(T_\sigma)$ – перший інваріант тензора напружень,
 $I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень,
 $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – середнє напруження,
 σ_u – інтенсивність напружень.

Показник η був також використаний для оцінки пластичності В.А. Бабічковим [5] і для побудови діаграм пластичності в координатах e_p - η Г.А. Смірновим-Аляєвим [6]. Вперше критерій руйнування, оснований на використанні діаграми пластичності запропонував Г.А. Смірнов-Аляєв [6].

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)} < 1, \quad (3)$$

де $e_p(\eta)$ – діаграма пластичності,
 ψ – використаний ресурс пластичності.

Критерій (3) відносно простий, але в ньому не враховується вплив історії деформування. В.Л. Колмогоров отримав критерій руйнування, в якому використана гіпотеза про пропорційну залежність густини пошкоджень від ступеня деформації [7]

$$\psi = \int_0^t \frac{\dot{e}_u d\tau}{e_p(\eta)} < 1. \quad (4)$$

Виходячи із нелінійної теорії накопичення пошкоджень, Г.Д. Дель, В.А. Огородніков, В.Г. Нахайчук запропонували критерій деформуємості в вигляді [8]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} n \frac{e_u^{n-1} de_u}{e_p(\eta)^n} < 1, \quad (5)$$

де $n = 1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}$.

В роботах В.А. Огороднікова, Ю.Г. Важенцева, А.А. Богатова, С.В. Смірнова, О.В. Нахайчука, І. О. Сивака [9-12] показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану характеризується двома показниками напруженого стану. В.А. Огородніков [2] вперше висунув гіпотезу про те, що на пластичність впливає третій інваріант тензора напружень $I_3(T_\sigma)$. Для кількісної оцінки цього впливу ним введено показник напруженого стану, який характеризує залежність пластичності від третього інваріанту тензора напружень і відрізняється від нуля тільки при об'ємному напруженому стані

$$\chi = \frac{\sqrt{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}. \quad (6)$$

Вибір показників напруженого стану η і χ в якості характеристик, які однозначно описують вплив історії навантаження на пластичність можна обґрунтувати наступним шляхом. Перепишемо формули (2) і (6) у виді:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \eta \sigma_u, \quad (7)$$

$$\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 = \chi^3 \sigma_u^3 \quad (8)$$

Так як інтенсивність напружень

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (9)$$

то, виходячи із рівнянь (7), (8) і (9) історію навантаження можна задавати або в просторі головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, або в просторі η, χ, σ_u . Нами пропонується використовувати простір з коефіцієнтами η, χ, e_u . Перевага такого підходу полягає в тому, що вид траєкторії навантаження в цьому просторі залежить тільки від умов формозмінення і не залежить від механічних характеристик металу, який деформується. При такому виборі координат для переходу від e_u до σ_u необхідно використовувати криву течії $\sigma_u(e_u)$.

Вибір координат η, χ, e_u обумовлений тим, що в цих координатах, залежність пластичності від схеми напруженого стану описується поверхнею граничних деформацій $e_p(\eta, \chi)$, яка при $\chi=0$ (плоский напружений стан) переходить в діаграму пластичності.

Необхідно відмітити, що на даний час відносно мало досліджень, присвячених оцінці впливу третього інваріанту тензора напружень на механіку процесу пластичної деформації та механічні характеристики деформованого металу.

В даній роботі для оцінки впливу схеми напруженого стану на пластичність пропонується використовувати поверхню граничних деформацій $e_p(\eta, \chi)$. На основі обробки експериментальних результатів, отриманих в роботі [13] нами побудовані поверхні граничних деформацій для сталей Р6М5 і Р18 (рис.1,2). Експериментальні поверхні $e_p(\eta, \chi)$ апроксимували залежностями [14]

$$e_p(\eta, \chi) = \frac{e_p(0,0) \exp(-\lambda \eta)}{1 + a\chi + b\chi^2}, \quad (10)$$

де $e_p(0,0)$ – гранична деформація при $\eta=\chi=0$,

$$\lambda = \ln \frac{e_p(-1,0)}{e_p(0,0)},$$

$e_p(-1,0)$ - гранична деформація при $\eta=-1; \chi=0$, а коефіцієнти a і b визначали методом найменших квадратів. В результаті отримали наступні апроксимації поверхонь граничних деформацій:

для сталі Р6М5

$$e_p(\eta, \chi) = \frac{0.24 \exp(-1.6\eta)}{1 + 2.014\chi + 3.064\chi^2}, \quad (11)$$

для сталі Р18

$$e_p(\eta, \chi) = \frac{0.3 \exp(-1.48\eta)}{1 + 1.7\chi + 2.1\chi^2}. \quad (12)$$

Для кількісної оцінки впливу напруженого стану і історії його зміни на пластичність процес навантаження задавали траєкторією $e_u(\eta, \chi)$ або шляхами деформування $\eta(e_u), \chi(e_u)$. Залежність пластичності від схеми напруженого стану характеризували поверхнею граничних деформацій $e_p(\eta, \chi)$. Тоді для випадків, коли знак похідних $\frac{d\eta}{de_u}$ і $\frac{d\chi}{de_u}$

не міняється, використаний ресурс пластичності ψ визначається за критерієм, який по своїй структурі подібний критерію В.Л. Колмогорова (4)

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \frac{de_u}{e_p(\eta, \chi)}, \quad (13)$$

де $\psi=0$ в початковому стані і $\psi=1$ при появі макротріщини.

Формула (13) отримана на основі гіпотези про лінійний закон процесу накопичення пошкоджень і при умові, що $\Delta\eta$ і $\Delta\chi$ не міняють знак в процесі формозміння.

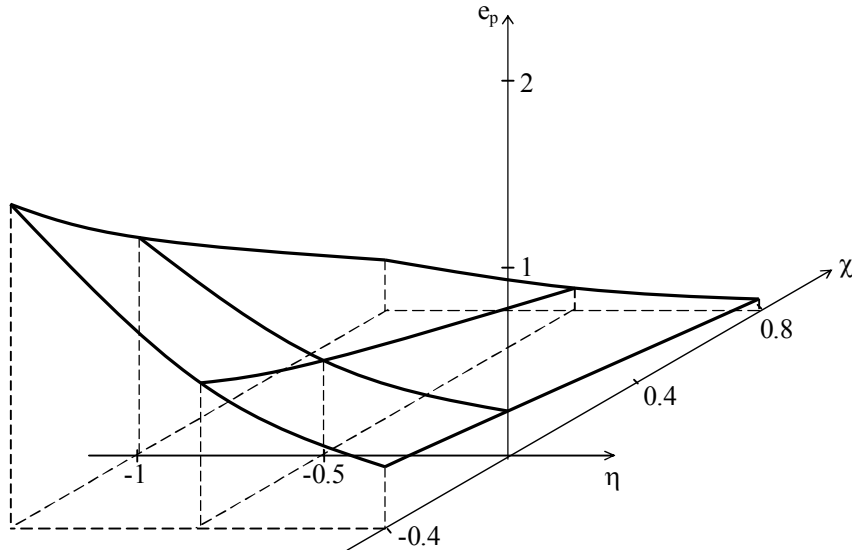


Рис. 1. - Поверхня граничних деформацій сталі P6M5.

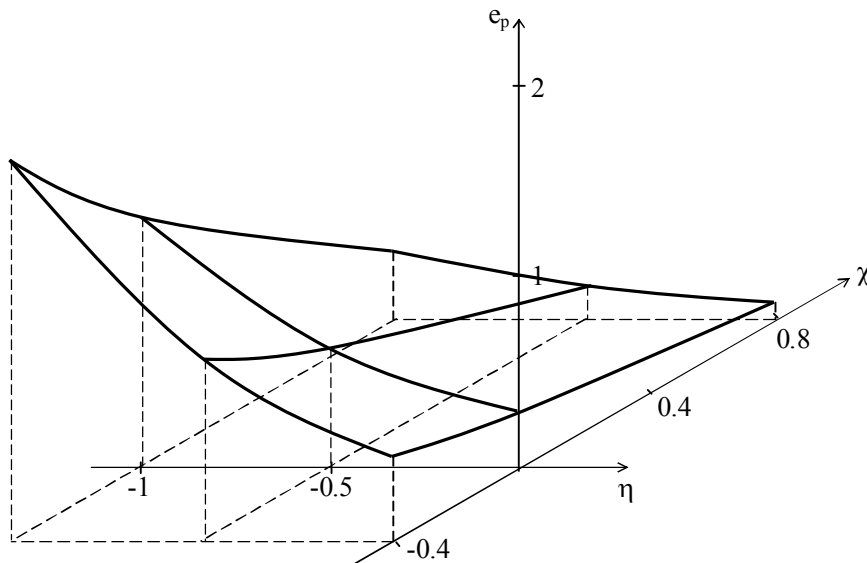


Рис. 2. - Поверхня граничних деформацій сталі P18.

Для траєкторій середньої кривизни без зломів, а також при зміні знаків $\Delta\eta$ і $\Delta\chi$ оцінку використаного ресурсу пластичності необхідно виконувати за критерієм, що враховує нелінійність закону накопичення пошкоджень, який подібний до критерію (5) [8]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} n \frac{e_u(\eta, \chi)^{n-1}}{e_p(\eta, \chi)^n} de_u, \quad (14)$$

де
$$n = 1 + a_1 \frac{d\eta}{de_u} + a_2 \frac{d\chi}{de_u},$$

a_1 и a_2 – емпіричні коефіцієнти, значення яких залежать від матеріалу.

Для сталей Р6М5 і Р18 $a_1=0,18$, $a_2=0,1$.

Кривизну траєкторії навантаження в просторі η , χ , e_u характеризували величиною

$$k = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 \eta}{de_u^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \chi}{de_u^2}\right)^2}. \quad (15)$$

Критерії (13) і (14) були використані для оцінки величини використаного ресурсу пластичності в процесах холодної об'ємної штамповки [15]. При цьому похибка оцінки граничних деформацій e_p не перевищувала похибок розрахунків інших характеристик напружено-деформованого стану при великих пластичних деформаціях.

Висновок

Таким чином, при пластичній деформації металів в умовах об'ємного напруженого стану для оцінки граничного формозмінення необхідно використовувати критерії (13), (14), так як відомі критерії руйнування, в яких залежність пластичності від схеми напруженого стану задається діаграмою пластичності $e_p(\eta)$, а історія навантаження траєкторіями $e_u(\eta)$ при об'ємному напруженому стані приводять до похибок, які можуть перевищувати (40...50)% [2,9,15].

Література

1. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении / В.В.Новожилов // Прикладная математика и механика. – 1965. – т. 29. – С. 681-689.
2. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А.Огородников – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
3. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
4. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов / С.И. Губкин; Т1: Физико-механические основы пластической деформации. – М.: изд. лит. по черной и цветной металлургии в 3 т, 1961. – 376 с.
5. Бабичков В.А. Об экспериментальных теоретических основаниях механической теории прочности / В.А. Бабичков // Труды МИИТ. – М.: Трансжелдориздат, 1951. – С.15-19.
6. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
7. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
8. Дель Г.Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г.Д. Дель, В.А. Огородников, В.Г. Нахайчук // Изв. вузов. Машиностроение. - 1975. - №4. - С. 135 - 140.
9. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А.Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.
10. Богатов А.А. Ресурс пластичности при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирецкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
11. Важенцев Ю.Г. Прочность и пластичность материалов под гидростатическим давлением / Ю.Г. Важенцев. – Томск: ТПИ, 1978. – 87 с.
12. Сивак И.О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации / И.О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ-Слов'янськ: ДДМА, 2000. – С. 168-171.
13. Костава А.А. Влияние объёмной схемы напряжённого состояния на пластичность / А.А. Костава, В.А. Огородников, И.Г. Савчинский // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. – Тула: ТПИ, 1977. – Вып.4. – С.126-135.
14. Нахайчук О.В. Оценка пластичности металлов при объёмном напряжённом состоянии / О.В. Нахайчук, Р.И. Сивак // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №5 - С.149-151.
15. Нахайчук О.В. Методы расчёта процессов холодной обработки давлением / О.В. Нахайчук // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С.119-123.