

В. А. Огородников<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. Деревенько<sup>2</sup>, асп., М. И. Побережный<sup>1</sup>, ассист.  
 1 - Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница, Украина  
 2 - Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

## КАРТЫ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*Сформовані карти матеріалів, що використовуються при моделюванні в процесах обробки металів тиском, які містять параметри моделей. Побудована діаграма пластичності алюмінієвого сплаву, відображаючи залежність пластичності від безрозмірного показника напруженого стану. Введені параметри напруженого стану, що враховують третій інваріант тензора  $\sigma_{ij}$  і механізм руйнування зрізом.*

*Formed card materials used in modeling in metal forming processes that contain parameters of the models. Constructed of aluminum alloy plasticity chart, reflecting the dependence of dimensionless plasticity index of stress state. Demonstrated the stress state parameters that take into account third invariant of the tensor  $\sigma_{ij}$  and the mechanism of destruction cut.*

### Вступ.

В работе [1] изложена методика формирования технологических карт материала, которые основываются на модели материала и содержат параметры этих моделей. Известна важная роль, которую приобрело моделирование в современном машиностроении, используемое в частности при разработке конструкций транспортных средств и технологий их изготовления.

На вход конечноэлементной модели подаются:

- модель геометрии конструкции;
- карты материала;
- граничные условия.

**Целью данной работы** является разработка методик формирования карт материала и обеспечение их экспериментальными данными.

В настоящей работе продолжено решение задач формирования технологических карт материала в частности формирование карты материала, представленной в виде диаграмм пластичности и диаграмм устойчивости материалов при пластическом деформировании.

### Диаграммы пластичности.

Под диаграммой пластичности в дальнейшем будем понимать механическую характеристику материалов, представленную в виде - пластичность как функция параметров схемы напряженного состояния. Пластичность - мера деформаций – накопленная интенсивность деформаций к моменту разрушения – предельная деформация:

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Зависимость  $\varepsilon_p$  от неких параметров напряженного состояния принято называть диаграммой пластичности [2]:

$$\varepsilon_p = f(\eta, \eta_2, Q) \quad (2)$$

Показатель (параметр) напряженного состояния - отношение первого инварианта тензора напряжений ко второму инварианту девiatora напряжений:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные напряжения,  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений.

Так при одноосном растяжении показатель  $\eta = 1$ , сжатии  $\eta = -1$ , сдвиге  $\eta = 0$ , двухосном растяжении  $\eta = 2$ .

Показатель  $\eta_2$  введен в работе [3]. Он отражает влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность. Его величина:

$$\eta_2 = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_i} \quad (4)$$

Показатель Q:

$$Q = \frac{1 - k\eta}{\omega} \quad (5)$$

используется для описания разрушения срезом [4], показатели  $\eta, \eta_2$  - используют для описания разрушения отрывом.

В соотношении (5) -  $k$  - параметр материала,  $\omega$  - соотношение максимального касательного напряжения к интенсивности напряжений:

$$\omega = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_i} \quad (6)$$

Таким образом, диаграмму пластичности будем разделять на два вида:

$\varepsilon_p = f(\eta, \eta_2)$  – разрушение отрывом,  $\varepsilon_p = f(Q)$  - разрушение срезом.

Диаграмму строят следуя методике, изложенной в работе [3] по результатам испытаний на одноосное растяжение, показатель  $\eta = 1$ ,  $\varepsilon_p(\eta = 1) = \ln \frac{d_0}{d_i}$ , либо,  $\varepsilon_p(\eta = 1) = \ln \frac{F_0}{F_i}$ , одноосное сжатие, показатель

$\eta = -1$ ,  $\varepsilon_p(\eta = -1) = \ln \frac{F_i}{F_0}$ , сдвиг (кручение),  $\eta = 0$ ,  $\varepsilon_p(\eta = 0) = \frac{tg\gamma}{\sqrt{3}}$ .

В указанных формулах -  $d_0, d_i, F_0, F_i$ - диаметры и площадь образцов до и в процессе деформирования,  $\gamma$  - угол сдвига, определяемый как угол образованный поворотом риски, нанесенной на образец до его скручивания.

#### Испытания плоских образцов на одноосное растяжение.

Испытания проводят с использованием образцов, вырезанных из листа по трем направлениям – вдоль прокатки, поперек прокатки и под углом  $45^0$  к направлению прокатки. Параметр анизотропии –  $r$  определяем по формуле:

$$r_i = \frac{\ln \frac{b_{0i}}{b_i}}{\ln \frac{b_i d_i}{b_{0i} d_{0i}}} \quad (7)$$

Затем по среднему значению пары этих параметров определяют соответствующий данному направлению параметр  $r$ :

$$r = \frac{r_{лев} + r_{прав}}{2} \quad (8)$$

Предельные устойчивые деформации определяют в результате измерений поперечного сечения образца до и после испытания. Главные деформации вычисляют как:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \ln \frac{b_0 d_0}{b d} \\ \varepsilon_2 &= \ln \frac{b}{b_0} \end{aligned} \quad (9)$$

где через  $b$  обозначена толщина, а через  $d$  – ширина образца.

Эквивалентная устойчивая деформация:

$$\varepsilon_i = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}{3}} \quad (10)$$

Приращение деформаций за пределами устойчивости вычисляем следующим образом. Отношение деформаций по ширине и толщине:

$$n = \frac{\ln \frac{b_{\min}}{b}}{\ln \frac{d_{\min}}{d}} \quad (11)$$

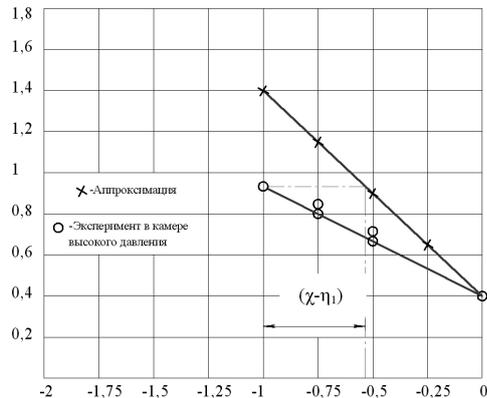
где  $b_{\min}$  - минимальная толщина в «шейке»,  $d_{\min}$  - соответственно минимальная ширина. Приращение эквивалентной деформации разрушения определим по формуле:

$$\varepsilon_i'' = \varepsilon_i' + 2 \ln \frac{d}{d_{\min}} \sqrt{\frac{1+n}{3} + \frac{n^2}{3} + 0,25 tg^2 \beta} \quad (12)$$

где  $\beta$  - угол между плоскостью разрушения и поперечным сечением образца.

**Объемная диаграмма пластичности.**

В дальнейшем изучаются процессы, сопровождающиеся объемной схемой напряженного состояния. В этом случае диаграмму пластичности строят по результатам испытаний цилиндрических образцов (растяжение ( $\eta_1 = +1$ ),



**Рис.1. Диаграмма пластичности стали Р 9, построенная в условиях наложения**

**гидростатического давления  $\varepsilon_p(\eta_2)$  и без давления  $\varepsilon_p(\eta_1)$**

кручение ( $\eta_1 = 0$ ), сжатие ( $\eta_1 = -1$ ). Получают диаграмму пластичности в условиях, главным образом, плоского напряженного состояния. Феноменологическая теория разрушения основана на ограничениях по деформациях, при этом часто рассматривают процессы, сопровождающиеся объемным напряженным состоянием.

Исследования показали, что в таких ситуациях на диаграмму пластичности оказывает влияние третий инвариант тензора напряжений.

Показатель  $\eta_2$  (см. формулу 4) учитывает влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность (предельную деформацию). В работах [3, 5] показано, что при прочих равных условиях наличие третьего инварианта тензора напряжений на пластичность оказывает влияние на вид диаграммы пластичности. Так опытами  $p+m+q$  (сила, крутящий момент, давление) показано что диаграмма пластичности  $\varepsilon_p(\eta_1)$  не совпадает с диаграммой  $\varepsilon_p(\eta_2)$ . Иначе говоря, следует строить объемную диаграмму пластичности в координатах  $\varepsilon_p(\eta_1, \eta_2)$ .

Двумерную диаграмму пластичности можно свести к одномерной, если ввести показатель X :

$$X = \eta_1 [1 + f(\eta_1) + \eta_2] \tag{13}$$

Функция  $f(\eta_1)$  оказалась практически не зависимой от свойств материалов (эксперименты проводили в камере высокого давления на материалах: сталь 45, дюралюминий Д1Т, сталь 40Х, стали Р 9, Р 18).

Вид функции в работе [3] представлен в виде:

$$f(\eta_1) = A\eta_1^2 + B\eta_1 + C \tag{14}$$

где коэффициенты аппроксимации:

- A = - 4,1 (сталь 40 X), - 3,1 (сталь 45);
- B = - 6,89 (сталь 40 X), - 9,89 (сталь 45)
- C = - 6,89 (сталь 40 X), - 9,89 (сталь 45)

Представим (14) в виде:

$$f(\eta_1) = \frac{X - \eta_1}{\eta_1 \eta_2} \tag{16}$$

Таким образом, с помощью диаграмм пластичности с привлечением формулы (3) можно оценить поправку, связанную с влиянием  $I_3(T_\sigma)$  на величину  $\varepsilon_p$ . Предельную деформацию в случае изучения процессов, сопровождающихся объемным напряженным состоянием можно определять по разности показателей  $\eta_1 - X$  (см. рис. 1). При этом показатель  $\eta_1$  находится в пределах  $0 \geq \eta_1 \geq -2$ . Подобный подход не требует построения пространственных диаграмм пластичности и необходимости проведения дополнительных экспериментов в камере высокого давления.

Привлекая феноменологические деформационные критерии деформируемости [3, 5] ресурс пластичности в процессах обработки металлов давлением, сопровождающимся объемной схемой напряженного состояния, можно рассчитать по критерию:

$$\psi = \int_0^{\varepsilon_p^*} (1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i}) \frac{\varepsilon_i(\eta_2)}{[\varepsilon_p(\eta_2)]^{1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i}}} d\varepsilon_i \leq 1 \tag{17}$$

где  $\varepsilon_i(\eta_2)$  - путь деформирования частицы материала в процессах обработки давлением,  $\frac{d\eta_2}{d\varepsilon_i}$  - «направление деформирования» в пространстве,  $\varepsilon_i(\eta_2), \varepsilon_p(\eta_2)$  - диаграмма пластичности, учитывающая влияние  $I_3(T_\sigma)$  на пластичность.

**Аппроксимация диаграмм пластичности.**

Среди многочисленных аппроксимаций диаграмм пластичности [1, 2, 5, 6] остановимся на тех, у которых коэффициенты аппроксимации имеют физический смысл. Так в работах [3, 5] приведена аппроксимация вида:

$$\varepsilon_p(\eta) = \varepsilon_p(\eta = 0) \exp(-\lambda_i \eta) \tag{18}$$

Здесь коэффициент  $\lambda_i$  равен:

$$\lambda_1 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta = 0)}{\varepsilon_p(\eta = 1)} \quad (19)$$

Его использование в уравнении (18) необходимо в пределах изменения показателя  $1 \geq \eta_1 \geq 0$ . Для интервала изменения показателя  $0 \geq \eta_1 \geq -1$  рассчитывают коэффициент:

$$\lambda_2 = \ln \frac{\varepsilon_p(\eta = -1)}{\varepsilon_p(\eta = 0)} \quad (20)$$

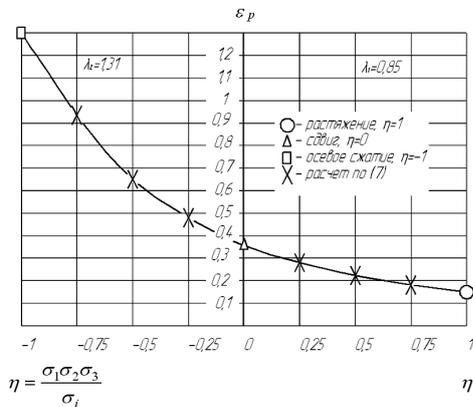


Рис. 2. Диаграмма пластичности алюминиевого сплава

На рис. 2 показана диаграмма пластичности алюминиевого сплава, аппроксимированная с помощью уравнения (18), где  $\lambda_1 = 0,85$ ,  $\lambda_2 = 1,31$

В полулогарифмических координатах  $\lambda_i$  - тангенсы угла наклона прямых, построенных в координатах  $\varepsilon_p(\eta)$ . Коэффициенты  $\lambda_i$  - это по существу коэффициенты чувствительности пластичности к изменению схемы напряженного состояния.

Чем больше эти коэффициенты, тем интенсивнее происходит рост пластичности с возрастанием гидростатического давления.

Подобное представление позднее опубликовано в монографии В.А. Скуднова [6], в которой с точки зрения физики металлов показана целесообразность введения коэффициентов "чувствительности" пластичности к изменению показателя  $\eta$ .

Так в указанной работе перегибы на диаграммах пластичности, построенных в полулогарифмических координатах связаны с показателем релаксационной способности (пластичности) поликристаллов  $m$ :

$$m = \frac{\ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (21)$$

$$m = \frac{KT}{U(\tau_{эф})} \quad (22)$$

$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \varepsilon}$  - показатель релаксационной способности (пластичности) поликристаллов - показатель чувствительности напряжения течения ( $\sigma_u$  или  $\tau_u$ ) к скорости деформации изменения времени, а величины  $\varepsilon_{пред}, \delta, \psi$ , есть следствие величины  $m$  (но только ее одной).

Как правило, в области ( $\eta_1 = 1$ ) наблюдается «аномальное» повышение предельной деформации. В некоторых случаях ее величина превышает деформацию при сдвиге ( $\eta_1 = 0$ ), что противоречит физическим представлениям. Введение показателя  $Q$  (см. формулу 5) позволяет расширить наши представления о механизме разрушения. Вероятно в этом случае наблюдается смешанный механизм разрушения (разрушение отрывом в центре меридионального сечения «шейки» - разрушение срезом на периферии (наблюдается «кратер»).

#### Выводы.

1. Разработаны методики построения диаграмм пластичности для различных механизмов разрушения - разрушение отрывом и разрушение срезом.
2. Экспериментально построены диаграммы пластичности и предложены их аппроксимации, имеющие физический смысл.
3. Предложен способ построения диаграмм пластичности в условиях объемного напряженного состояния без привлечения экспериментов в камерах высокого давления.

#### Список литературы

1. Солоня Е. В., Деревенько И. А., Федотов В. А., Перлов В. Е. Определение параметров моделей, формирующих паспорт материалов в процессах обработки давлением. // Зб. наук. пр. ВДАУ. Серія: Технічні науки. - Вінниця, 2011. - Випуск 6 - С. 3 - 10.
  2. Смирнов - Аляев Т. А. Механические основы пластической обработки металлов. - Л.: Машиностроение. 1978. - 368 с.
  3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. / В. А. Огородников. - К.:Вища шк., 1983 - 175 с.
  4. Елисеев В. В., Гольцев А. М., Елизаров Ю. М. Экспериментальное построение диаграмм предельных деформаций листовых материалов // Межвузовский сборник "Теория и практика машиностроительного оборудования". - Выпуск 13 - Воронеж - 2003. - С. 180 - 188.
  5. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников - К.: УМК ВО, 1989 - 152 с.
- Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов. М.: "Металлургия", 1989, 176с.