ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ, СВЯЗАННЫХ С ИХ РАЗРУШЕНИЕМ

Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В., Арышенский В.Ю., Зайцев В.М.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Феноменологические критерии разрушения характеризуются предельно допустимой деформацией, которая зависит от свойств материала и его напряженно-деформированного состояния. Однако при листовой штамповке принимают схему плоского напряженного состояния. Согласно принятой индексации осей анизотропии считаем, что $\sigma_3 = 0$.

Экспериментальным путем строят диаграмму пластичности с осями $\varPi = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_{i1}}$ (или подобным $\dfrac{\sigma_{cp}}{T}$) и $e_{i\kappa p}\left(\varGamma_{\kappa p}\right)$. Здесь $\varPi$ показатель напряженного состояния, а $e_{i\kappa p}\left(\varGamma_{\kappa p}\right)$ - интенсивность деформации, отражающие разрушение материала, которые выражаются через его механические свойства (обычно через относительное сужение $\psi_ш$.

Если ввести обозначения $m = \dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}$ и $m_1 = \dfrac{1}{m} = \dfrac{\sigma_1}{\sigma_2}$, то показатель $\varPi$ запишется следующим образом:

$$\varPi = \frac{1+m}{\sqrt{1 - 2\mu_{21} m + \dfrac{\mu_{21}}{\mu_{12}} m^2}} \quad \varPi = \frac{1+m_1}{\sqrt{m_1^2 - 2\mu_{21} m_1 + \dfrac{\mu_{21}}{\mu_{12}}}} \qquad (1)$$

Диаграммы пластичности, полученные экспериментальным путем, приведены в работах Г.А. Смирнова Аляева [1], В.Л. Колмогорова [2]. Процесс построения диаграмм достаточно трудоемок, т.к. приходится проводить испытания образцов при различных схемах напряженно-деформированного состояния. Желательно иметь их аппроксимацию, хотя бы в приближенном виде.

В данной статье приведена аппроксимация (линейная и степенная) по двум точкам. В качестве первой из них выбрана точка, связанная с линейным растяжением. Как известно, здесь $\varPi = 1$, а

$$\left(e_i\right)_{\text{р}} = \ln\frac{F_0}{F_ш} = \ln\frac{1}{1-\psi_ш} \qquad (2)$$

Экспериментальные данные Г.А. Смирнова-Аляева показали, что при плоской деформации

$$\left(e_i\right)_{\text{кр}} = 0.55\ln\frac{1}{1-\psi_ш} \approx \frac{1}{\sqrt{3}}\ln\frac{1}{1-\psi_ш} \qquad (3)$$

Для ортотропного материала переходные коэффициент $\frac{1}{\sqrt{3}}$ следует заменить на $\frac{1}{m_a}$, где

$$m_a = \sqrt{\left(1-2\mu_{21}+\frac{\mu_{21}}{\mu_{12}}\right)\frac{1+\mu_1}{1-\mu_1}} \qquad (4)$$

Здесь μ_{ij} - коэффициент Пуассона в пластической области, отражающий анизотропию полуфабриката. В μ_{ij} первый индекс показывает направление поперечной деформации, а второй действие силы; коэффициент μ_1 определен на образце, вырезанном под углом 45^0 к осям "1"(направлению прокатки) и "2"(поперечному).

Показатель напряженного состояния при плоской деформации ($e_2 = 0$)

$$П = \frac{1+\mu_{12}}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}} \qquad (5)$$

Возьмем точку, связанную с плоской деформацией за вторую точку аппроксимации. Тогда ее можно записать в виде:

- в линейной форме записи

$$\left(e_i\right)_{\text{кр}1} = \ln\frac{1}{1-\psi_ш}\left[1+\frac{\left(\frac{1}{m_a}-1\right)\left(П-1\right)}{\frac{1+\mu_{12}}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}-1}\right] \qquad (6)$$

- в степенной форме

$$\left(e_i\right)_{\text{кр}2} = \ln\frac{1}{1-\psi_ш} m_a^{\frac{\frac{1-П}{1+\mu_{12}}}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}} \tag{7}$$

В качестве примера рассмотрим титановый сплав ОТ4 (μ_{21} =0.78, $\mu_1 = \mu_{12} = 0.8$), который можно принять как трансверсально-изотропный μ =0.8. Расчет приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Значение $e_{i\text{кр}}$ по аппроксимациям (6) и (7)

m_1	$П$	$e_{i\text{кр}1}$	$e_{i\text{кр}2}$	m	$П$	$e_{i\text{кр}1}$	$e_{i\text{кр}2}$
-1	0	0.64	0.71	-0.2	0.93	0.52	0.52
-0.8	0.12	0.62	0.68	-0.4	0.45	0.58	0.61
-0.6	0.27	0.60	0.65	-0.6	0.29	0.60	0.65
-0.4	0.45	0.58	0.61	-0.8	0.11	0.62	0.68
-0.2	0.69	0.55	0.58	-1.0	0	0.64	0.71
0	1.00	0.51	0.51	0	1.00	0.51	0.51
				0.2	1.41	0.46	0.44
				0.4	1.92	0.39	0.37
				0.6	2.56	0.31	0.30
				0.8	2.94	0.26	0.26
				1.0	3.1	0.24	0.24

Таким образом, в области двухосного растяжения и в случае, когда сжимающее напряжение не велико обе аппроксимации имеют практически одни и те же значения. Если использовать диаграмму пластичности для этого сплава, полученную В.Л. Колмогоровым [2,3] и произвести ее пересчет по формулам

$$\Lambda_\text{р} = m_a\left(e_i\right)_\text{кр}; \qquad \frac{\sigma}{T} = \frac{П}{m_a},$$

то можно убедиться, что аппроксимации дадут результат, имеющий расхождение не более 5-7%.

В качестве примера приведем расчет допустимого радиуса гиба при гибке моментом. При гибке широких листов наблюдается схема плоской деформации ($e_2 = 0$). Следовательно, материал разрушается при достижении

$$\left(e_i\right)_{\text{кр}} = \frac{1}{m_a} \ln \frac{1}{1-\psi_ш} \cdot$$

С другой стороны

$$e_i = \frac{e_1\left(e_\theta\right)}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}} \cdot \tag{8}$$

В предельном случае

$$\frac{e_1\left(e_\theta\right)}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}} = \frac{1}{m_a} \ln \frac{1}{1-\psi_ш} \cdot \tag{9}$$

Тогда

$$e_\theta = e_{1\text{кр}} = \frac{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}{m_a} \ln \frac{1}{1-\psi_ш} \cdot \tag{10}$$

Известно, что для растянутой зоны, а в ней и происходит разрушение:

$$e_\theta = \ln \frac{\rho}{\rho_н}, \tag{11}$$

где $\rho_н = \sqrt{R_н r_{вн}}$ - радиус нейтральной поверхности, а $R_н$, $r_{вн}$ соответственно наружный и внутренний радиусы гиба.

Примем $\rho = R_н$. Подставляя (10) в (11) и рассматривая относительные радиусы

$$\overline{R}_н = \frac{R_н}{S}; \qquad \bar{r}_{вн} = \frac{r_{вн}}{S}; \qquad \overline{R}_н = \bar{r}_{вн} + 1,$$

получим $$e_\theta = \ln \sqrt{1 + \frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}{m_a} \ln \frac{1}{1-\psi_ш}$$

или $$1 + \frac{1}{2} = \frac{1}{\left(1-\psi_ш\right)\dfrac{2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}{m_a}}$$

Отсюда

$$\overline{r_{вн.\,доп}} = \frac{\left(1-\psi_{ш}\right)^{\frac{2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}{m_a}}}{1-\left(1-\psi_{ш}\right)^{\frac{2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}{m_a}}} \qquad (12)$$

Согласно [3] $\dfrac{2\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}{m_a} = \dfrac{1}{K_a}$, где

$$K_a = \frac{1}{2}\sqrt{\left(1-2\mu_{21}+\frac{\mu_{21}}{\mu_{12}}\right)\frac{1+\mu_1}{1-\mu_1\left(1-\mu_{12}\mu_{21}\right)}} \qquad (13)$$

В случае изотропного тела K_a=1. С учетом (13), (12) примет вид:

$$\left(\overline{r_{вн}}\right)_{доп} = \frac{\left(1-\psi_{ш}\right)^{\frac{1}{K_a}}}{1-\left(1-\psi_{ш}\right)^{\frac{1}{K_a}}}\,. \qquad (14)$$

Для изотропного тела:

$$\left(\overline{r_{вн}}\right)_{доп} = \frac{1}{\psi_{ш}} - 1.$$

Для ОТ4 $\dfrac{1}{K_a}$=0.672, и $\left(\overline{r_{вн}}\right)_{доп}$=2.6. Без учета анизотропии $\left(\overline{r_{вн}}\right)_{доп}$ =1.5, что не соответствует экспериментальным данным

ВЫВОДЫ:

1. Получены линейная и степенная аппроксимации диаграммы пластичности.

2. Судя по экспериментальным данным Смирнова Аляева и Колмогорова, ее можно использовать при расчете предельного формоизменения процессов листовой штамповки.

Список литературы

1.Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов.- Л.: Машиностроение, 1968-272с.

2.Колмогоров В.П. Напряжение, деформация, разрушение.- М.: Металлургия, 1970- 223с.

3.Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Металлургия, 1990- 304с.