

# ПРОГНОЗИРАНЕ НА ПРЕДЕЛНИТЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПЛАСТИЧНО ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ НА ЛИСТОВ МЕТАЛ

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

### PROGNOSTICATION OF LIMITING DEFORMATIONS AT SHEET METAL FORMING

доц. д-р инж. Генев Й., инж. Димитрова А., д-р инж. Камбуров В.  
 Машинно-технологичен факултет, Технически Университет – София, България

**Abstract:** There are investigated some proposed theoretical models possibilities for permissible strength strain forecasting at sheet metal forming. There are reached some conclusions of particular models heuristic potential based on models comparing and their testing with experimental data. A suggestion to determination of strain hardening exponent is made in order to achieve better correspondence of the prognosticated permissible strain to the experimental records.

**KEYWORDS:** PLASTIC DEFORMATION, SHEET FORMING, FORMING LIMIT DIAGRAMS

#### 1. Увод

Многообразието от модели за прогнозиране на пределните деформации на листов метал, изведени при различни изходни предпоставки и критерии, и различаващите се понякога съществено техни резултати обуславят необходимостта от търсене на допълнителна информация за евристичния потенциал на моделите.

Известните модели са изведени въз основа на концепцията, че пределните деформации се лимитират от загубата на устойчивост на пластичното формоизменение в резултат от локализиране на деформацията. В зависимост от приетия формален критерий за загуба на устойчивост, моделите са обособени в два основни класа – модели, изведени въз основа на силов и модели въз основа на кинематичен критерий.

В настоящата работа е представен сравнителен анализ на прогнозираните от различни модели пределни устойчиви интензивности на деформациите като функция на напрегнатото състояние  $m = \sigma_2 / \sigma_1$ .

От моделите, използващи силовия критерий, който регистрира загубата на устойчивост, приемайки, че локализирането на деформацията възниква при максимална стойност на силата ( $dP_1 = 0$ ) или силите ( $dP_1 = dP_2 = 0$ ) за деформиране се разглеждат следните модели:

• модел, отразяващ възникването на разсеяна локална деформация [2], [3], [4]:

$$e_{in} = \frac{2(l - m - m^2)^{\frac{1}{2}}}{2 - m} n; \quad (1)$$

• модел, отразяващ възникването на разсеяна локална деформация [10], [11]:

$$e_{in} = \frac{4(l - m + m^2)^{\frac{3}{2}}}{4 - 3m - 3m^2 + 4m^3} n; \quad (2)$$

• модел, отразяващ възникването на съсредоточена локална деформация [1], [7]:

$$e_{in} = \frac{2(l - m + m^2)^{\frac{1}{2}}}{m + 1} n; \quad (3)$$

• модел, отразяващ възникването на съсредоточена локална деформация [9]:

- за  $\beta = e_1 / e_2 < 0$

$$e_1 = \left( \frac{n}{1 + \beta} \right) \left\{ \frac{1 - n}{2} \left[ \frac{(1 + n)^2}{4} - \frac{\beta n}{(1 + \beta)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (4)$$

- за  $\beta \geq 0$

$$e_1 = \frac{3\beta^2 + (2 + \beta)^2 n}{2(2 + \beta)(1 + \beta + \beta^2)}, \quad (5)$$

където  $e_1$  и  $e_2$  са линейни логаритмични деформации.

• модел, отразяващ възникването на съсредоточена локална деформация [6]:

$$R'_e = \left[ \frac{\beta}{e_i} \left( \frac{1}{2 + \beta} - \frac{1 + 2\beta}{2\alpha} \right) - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\alpha}} \right] R_e, \quad (6)$$

където:  $\alpha = 1 + \beta + \beta^2$ ;  $e_i$  – интензивност на деформациите;  $R_e$  – напрежение на провлачване, съгласно функцията на деформационно уякчаване.

Моделите, изведени въз основа на кинематичен критерий [5], [7], [8], предполагат начална геометрична или структурна нехомогенност в листовия метал, в зоната на която възниква локализиране на деформацията. С възможност за аналитично определяне на пределната интензивност на деформациите е моделът [5]:

$$D \frac{\sigma_1}{S} - \sigma_1 C (2\sigma_2 - \sigma_1) + \frac{4R_e^2 n (2e_3 + e_2)}{3S e_{in}^2} = 0, \quad (7)$$

където:  $S$  – дебелина на листовия метал.

$$D = 2\sigma_1 - \sigma_2 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} (2\sigma_2 - \sigma_1), \quad C = \frac{3e_2}{S(-2e_3 - e_2)^2}.$$

В приведените модели с  $n$  е означен степенният показател във функцията на деформационното уякчаване.

#### 2. Адаптирани модели

Моделът, изразен чрез изрази (4) – (5), се адаптира към пределна устойчива интензивност на деформациите чрез съотношението:

$$e_{in} = \frac{2(l - m + m^2)^{\frac{1}{2}}}{2 - m} e_1 \quad (8)$$

Моделът (6) за изотропно уякчаващ се листов метал със степенна функция на деформационното уякчаване:

$$R_e = K e^n, \quad (9)$$

получава вида:

$$e_{in} = \frac{2\sqrt{\alpha}}{\sqrt{3}} \left[ n - \beta \left( \frac{1}{2 + \beta} - \frac{1 + 2\beta}{2\alpha} \right) \right], \quad (10)$$

където:  $\alpha = 1 + \beta + \beta^2$ ;  $\beta = \frac{e_2}{e_1} = \frac{2m - 1}{2 - m}$ .

Моделът, изразен чрез (7), с използване на зависимостите:

$$e_1 = \frac{2-m}{2(1-m+m^2)^{\frac{1}{2}}} e_i, \quad e_2 = \frac{2m-1}{2(1-m+m^2)^{\frac{1}{2}}} e_i,$$

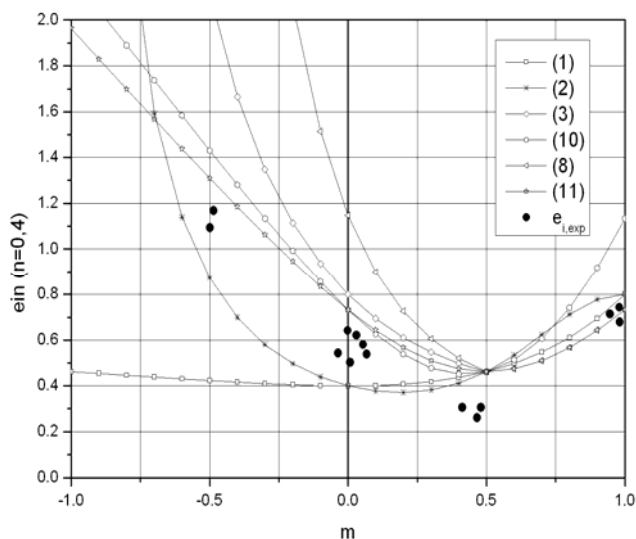
$$e_3 = -\frac{m+1}{2(1-m+m^2)^{\frac{1}{2}}} e_i, \quad \sigma_1 = \left( \frac{R_e^2}{1-m+m^2} \right)^{\frac{1}{2}},$$

получава вида:

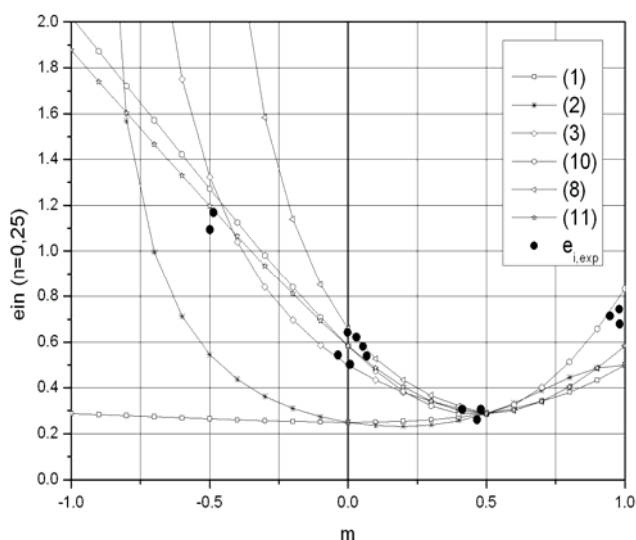
$$e_{in} = \frac{3n+(2m-1)^2}{3(1-m+m^2)^{\frac{1}{2}}}. \quad (11)$$

### 3. Резултати и дискусия

На фиг. 1 и 2 е представено графичното съпоставяне на прогнозираната с моделите пределна устойчива интензивност на деформациите  $e_{in}$  за конкретни стойности на показателя на деформационно уякчаване – съответно  $n = 0,4$  и  $n = 0,25$ .



Фиг. 1 Прогнозирана от моделите пределна устойчива интензивност на деформациите  $e_{in}$  за  $n = 0,4$



Фиг. 2 Прогнозирана от моделите пределна устойчива интензивност на деформациите  $e_{in}$  за  $n = 0,25$

На фигурите с точки са отбелязани експериментални данни за  $e_{in}$ . Те се отнасят [5] за материал “мед” и имат следните стойности (табл. 1).

Таблица 1 Експериментални данни за материал „мед”

$m_{експ.}$	-0,4857	-0,4984	-0,0018	0,0303	-0,0356	0,0543	0,0075
$e_{експ.}$	1,1682	1,0941	0,6412	0,6207	0,5432	0,5798	0,5016
$m_{експ.}$	0,0672	0,4130	0,4661	0,4798	0,9461	0,9816	0,9801
$e_{експ.}$	0,5387	0,3063	0,2606	0,3064	0,7131	0,6782	0,7429

Моделите са единни само за стойността на  $e_{in}$  за:

$$m = 0,5; \quad e_{in} = \frac{2}{\sqrt{3}} n.$$

Извън тази стойност на  $m$  те прогнозираат различни, най-вече в интервала  $m \in (1; 0,5)$ , стойности на пределните интензивности на деформациите.

### 4. Анализ на резултатите

Моделът (1) прогнозира в интервала  $m \in (-1; 0,5)$  по-малки стойности на  $e_{in}$  от тези в интервала  $m \in (0,5; 1)$ , което не се споделя от останалите модели. Този резултат не съответства и на експерименталните данни.

Моделите (2), (3) и (8) прогнозираат за  $m = -1$  безкрайно големи интензивности на деформациите, за което също няма експериментално потвърждение.

Моделите (1) и (2) демонстрират в интервала  $m \in (-1; 0,5)$  различен от останалите модели характер на изменение на  $e_{in} = f(m)$ .

От гореизложеното следва, че в интервала  $m \in (-1; 0,5)$  или поне за отделна негова част, може да се търси евристичен потенциал само в моделите (3), (8), (10) и (11).

С известно приближение по отношение на модела (10), прогнозираната от тези модели стойност на  $e_{in}$  за  $m = 0,5$  е минимална:

$$e_{in,min} = \frac{2}{\sqrt{3}} n$$

С използване на израза за интензивност на деформациите от този резултат следва, че при  $m = 0,5$  главната линейна деформация  $e_1$  има стойност, равна на степения показател на деформационно уякчаване  $n$ , т. е.  $e_{1min} = n$ .

По отношение на стойността на степения показател  $n$ , участващ като основен параметър в моделите, следва да се направят някои уточнения, произтичащи от съпоставянето на прогнозираните резултати с експерименталните данни. Обикновено  $n$  се определя от експеримент на едномерен опън, т. е при  $m = 0$  и се приема равна на максималната равномерна деформация. Използването на тази стойност в моделите показва завишени стойности за прогнозираните пределни деформации. На фиг. 1 графичната интерпретация на моделите е представена за стойност  $n = 0,4$  за материал “мед”, получена при едномерен опън. На фиг. 2 графиките са построени при стойност на  $n = 0,25$ , отчетена от експерименталните данни като равна на минималната стойност на деформацията  $e_1$  при  $m = 0,5$ .

Съпоставянето на прогнозираните пределни деформации с експерименталните данни в двата случая показва, че по-добро съответствие се наблюдава при стойност на  $n = e_{1min}$ , отчетена при  $m = 0,5$ .

### 5. Заключение

Разгледаните модели за прогнозиране на пределните устойчиви интензивности на деформациите показват една и съща стойност на  $e_{in}$ , при  $m = 0,5$ .

Моделите с евристичен потенциал (3), (8), (10) и (11) демонстрират при  $m = 0,5$  минимална стойност на пределната интензивност на деформациите:

$$e_{in,min} = \frac{2}{\sqrt{3}} n .$$

По-добро съответствие с експерименталните резултати се постига, когато стойността на параметъра  $n$  в моделите се приеме равна на минималната стойност на главната логаритмична деформация, определена при двумерен опън ( $m = 0,5$ ),  $n = e_{1min}$ .

Може да се приеме (фиг. 2), че моделът (3) апроксимира задоволително експерименталните данни в интервала  $m \in (-0,5; 0,5)$ , моделът (8) – в интервала  $m \in (0;1)$ , моделите (10) и (11) – в интервала  $m \in (-1;1)$ .

## 6. Литература

1. Баркая В. Ф., С. Е. Рокатян, Ф. И. Рузанов, Формоизменение листового металла, М. Металлургия, 1976.
2. Головлев В. Д., Расчеты процессов листовой штамповки, М. Машиностроение, 1974.
3. Дель Г. Д., Технологическая механика, М. Машиностроение, 1978.

4. Томленов, А. Д., Теория пластического деформирования металлов, М. Металлургия.

5. Чумадин А. С., Об одном подходе к расчету предельного деформирования при листовой штамповке, “Кузнечно–штамповочное производство”, 1999, №6.

6. Hora P., L. Tong, J. Reissner, A Failure Criterion for Prediction of Strain Path Dependent Failures for Quadratic and Non-quadratic Yield Loci, NUMISHEET'96, Dearborn, Michigan, USA, September 29 - October 3, 1996.

7. Korhonen A. S., On the Theories of Sheet Metal Necking and Forming Limits, Journal of Engineering Materials and Technology, 1978, vol. 100.

8. Marciniak Z., K. Kuczinski, Limits Strain in The Processes of Stretch Forming Sheet Metal, Int. J. Mech. Sci., 1967, vol. 9.

9. Stören S., J.R. Rice, Localised Necking in Thin Sheets, J. Mech. Phys. Solids, 1975, vol. 23.

10. Swift H. W., Plastic Instability Under Plane Stress, Journal of Mechanics of Solid, 1952, v.1.

11. Venter R. D., M. C. de Malherbe, Theoretical Estimate of The Keeler – Godwin Formability Curve, Sheet Metal Industries, Sept. 1971.