

Грушко О. В.
Кириця І. Ю.

КРИТЕРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ З ВРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ В ПАРАМЕТРИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

Немонотонність поведінки пластичності матеріалів в області додатних гідростатичних тисків залежно від класичного показника напруженого стану призводить до необхідності пошуку більш вдалих параметрів в якості аргументу діаграми пластичності. В роботі запропоновано параметр напруженого стану, який залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу. Коефіцієнти впливу є механічними властивостями матеріалу. Діаграму пластичності в карті металу, за допомогою введеного параметра напруженого стану, пропонується апроксимувати монотонно спадаючою експоненціальною функцією. Встановлено, що вплив головних нормальних напружень є неоднаковим щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу, що дає можливість формування моделі пластичності, зокрема для матеріалів з різною реологією. Встановлено, що коефіцієнт впливу третього відносного головного напруження для маловуглецевих сталей, алюмінієвих та титанових сплавів становить – 0,76... 0,85.

Рекомендовано в відомих моделях деформовності застосовувати в якості аргументу діаграми пластичності запропонований нами параметр напруженого стану, оскільки фізичного змісту накопичення пошкоджень даний параметр не змінює. Область застосування того чи іншого критерію залишається у відповідності з рекомендаціями його використання в залежності від виду процесу і історії навантаження. Виконано порівняльний розрахунок використаного ресурсу пластичності за відомими критеріями та критеріями, які враховують властивості матеріалу через параметр напруженого стану. Використання діаграми пластичності, побудованої за допомогою запропонованого параметра напруженого стану, для процесів холодного пластичного деформування, які протікають в області додатного гідростатичного тиску, залежно від виду шляху деформування та особливостей реології металу уточнює значення використаного ресурсу пластичності металу до 2-х разів, що дозволяє зменшити кількість браку виробів до 50 % для процесів, режими яких пораховані за граничними деформаціями.

Ключові слова: холодне пластичне деформування, пластичність, параметр напруженого стану, діаграма пластичності, критерії деформовності, використаний ресурс пластичності.

В основі сучасної теорії деформовності лежить гіпотеза про залежність пластичності від схеми напруженого стану, яка описується діаграмою пластичності. Діаграми пластичності в більшості теорій описують експериментальну залежність граничної деформації ϵ_p від показника жорсткості напруженого стану η .

В останніх роботах Г. Д. Деля, В. А. Огороднікова, А. А. Богатова, Ю. Г. Важенева, С. В. Смірнова показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану характеризується, як мінімум, двома показниками напруженого стану [1–6]. В. А. Огородніков вважав, що при об'ємному напруженому стані необхідно враховувати вплив на пластичність третього інваріанта тензора напружень [1, 5]. Такий підхід дозволив отримати позитивні результати при розробці ряду процесів обробки тиском, які реалізуються в умовах об'ємного напруженого стану [7, 8].

Для оцінки деформовності заготовок і для технологічного забезпечення якості готових виробів необхідна інформація про історію деформування кожної матеріальної частинки в об'ємі заготовки.

Із результатів досліджень останніх років витікає, що при об'ємному напруженому стані, а також в деяких випадках плоского напруженого стану, значення граничної деформації ϵ_p виявляються різними для схем, які характеризуються одним і тим же значенням показника напруженого стану η .

Вважається, що пластичність металу достатньо добре описується показником η при його від'ємних значеннях. Однак, в додатній області, для пластичних металів, спостерігається немонотонність залежності пластичності від η . Часто деформації при розтягу перевищують деформацію зсуву; при двовісному розтягу пластичність співмірна з деформацією одновісного розтягу, а при плоскому деформованому стані може бути найменшою з відмічених [1-6]. Тобто

функція, що описує пластичність за допомогою даного показника буде немонотонна, що вносить невизначеність при апроксимації і екстраполяції експериментальних даних. Пошук зручного показника (параметра) і функції діаграми пластичності, що відповідають умовам монотонності, нульовій пластичності при рівномірному тривісному розтягу і задовільній кореляції з експериментальними даними до цих пір є дискусійним питанням. Не виключено, що універсальний показник напруженого стану, інваріантний по відношенню до механічних властивостей матеріалу може взагалі не існувати, чи, зокрема, бути однаковим лише для вибраної групи матеріалів (наприклад, сталь, алюмінієві сплави і т. д.) [2–4]. На існування такого параметру вказують роботи Г. Д. Деля [3, 4]. Тобто для кожного матеріалу, власне кажучи, може бути свій параметр, від якого залежить його пластичність.

В роботі запропоновано підхід, який створюватиме перспективи щодо побудови діаграми пластичності з використанням нового параметра напруженого стану ζ . Даний параметр використовується в якості аргументу діаграми пластичності

$$\zeta = \frac{k_1\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3}{\sigma_i} = k_1\bar{\sigma}_1 + k_2\bar{\sigma}_2 + k_3\bar{\sigma}_3 \quad (1)$$

де $\bar{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$, $\bar{\sigma}_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$, $\bar{\sigma}_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_i}$ – відносні головні напруження;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти впливу відносного головного напруження на пластичність металу.

Базуючись на дослідженнях проведених в роботах [9, 10] встановлено, що вплив головних нормальних напружень є неоднаковим щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу, що дає можливість формування моделі пластичності, зокрема для матеріалів з різною реологією.

Діаграма пластичності $e_p(\zeta)$ описується експоненціальними функціями і має суттєво кращу кореляцію з експериментом, ніж традиційна діаграма пластичності.

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \zeta) = d \cdot \exp\left(-q \cdot (\bar{\sigma}_1 + \bar{k}_2\bar{\sigma}_2 + \bar{k}_3\bar{\sigma}_3)\right), \quad (2)$$

де $\bar{k}_2 = \frac{k_2}{k_1}$, $\bar{k}_3 = \frac{k_3}{k_1}$ – коефіцієнти впливу відносного головного напруження, які виражені в частках стосовно коефіцієнта k_1 першого головного напруження σ_1 .

Незручність використання параметра ζ полягає в його унікальності для кожного матеріалу, що робить неможливим порівняння діаграм $e_p(\zeta)$ для різних металів на одному рисунку, на відміну від звичайної діаграми пластичності.

Використання запропонованого параметра напруженого стану ζ і відповідної апроксимації (2) в відомих моделях руйнування полягає в тому, що замість традиційної функції діаграми пластичності $e_p(\eta)$ слід застосовувати функцію діаграми $e_p(\zeta)$, оскільки фізичного змісту накопичення пошкоджень параметр ζ не змінює. Область застосування того чи іншого критерія залишається у відповідності з рекомендаціями його використання в залежності від виду процесу і історії навантаження.

Таким чином, аналітичні залежності розрахунку використаного ресурсу пластичності і критерії руйнування запишуться з урахуванням $e_p(\zeta)$ наступним чином (звернемо увагу тільки на деформаційні критерії). Відомі та скореговані критерії наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Відомі та скореговані деформаційні критерії

Відомі деформаційні критерії	Скореговані деформаційні критерії
Критерій Г. А. Смірнова-Аляєва [1]: $\Psi = \frac{e_i}{e_p(\eta)} \leq 1 \quad (3)$	$\Psi_\zeta = \frac{e_i^*}{e_p(\zeta)} < 1 \quad (6)$
Критерій В. Л. Колмогорова [1]: $\Psi = \int_0^{e_p^*} \frac{de_i}{e_p(e_i)} \leq 1 \quad (4)$	$\Psi_\zeta = \int_0^{e_i^*} \frac{de_i}{e_p(\zeta)} < 1 \quad (7)$
Критерій В. А. Огороднікова, Г. Д. Деля, В. Г. Нахайчука [2, 6]: $\Psi = \int_0^{e_i} \left(1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i} \right) \cdot \frac{e_i^{0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}}{[e_p(\eta(e_i))]^{1+0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}} de_i \leq 1 \quad (5)$	$\Psi_\zeta = \int_0^{e_i^*} (1 + 0.2 \cdot f) \cdot \frac{e_i^{0.2 \cdot f}}{[e_p(\zeta)]^{1+0.2 \cdot f}} de_i < 1 \quad (8)$

Залежність, що отримана на основі тензорного критерію А. А. Ільюшіна, Г. Д. Деля [2]:

$$d\psi_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} (1 - a + 2a\varphi) \frac{d\varepsilon_{ij}^p}{e_p(\zeta)},$$

$$\Psi_\zeta = \frac{a - 1 + \sqrt{(1 - a)^2 + 4a\sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}}}}{2a} < 1. \quad (9)$$

Покажемо використання критерію тензорної моделі нелінійного накопичення пошкоджень:

за Делем Г. Д. [2]

$$\Psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(1 - a + 2a \frac{e_i}{e_p(\zeta)} \right) \beta_{ij} \frac{de_i}{e_p(\zeta)}, \quad (10)$$

де $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_i}$ – направляючий тензор швидкостей деформацій, $a = const$, з урахуванням запропонованого параметра ζ для прогнозування залишкової пластичності металу заготовки.

В свою чергу умова руйнування запишеться у вигляді:

$$\Psi_{ij} \cdot \Psi_{ij} = 1. \quad (11)$$

Направляючий тензор швидкостей деформацій β_{ij} варто поставити в залежність від параметра ζ :

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_i} = f_{ij}(\zeta), \quad (12)$$

де $f_{ij}(\zeta)$ – функція, що пов'язує історію навантаження з параметром ζ .

Залежність $f_{ij}(\zeta)$ може бути розрахована з використанням ЕОМ за напружено-деформованим станом.

Далі необхідно підставити вираз (12) у (10) і отримати компоненти тензора пошкоджень $\Psi_{ij} \Psi_{ij}$. Остаточно, залишкова пластичність у довільному напрямку при розтягуванні зразка, вирізаного з деформованої деталі, може бути оцінена за формулою (13)

$$\frac{e_{p11}}{e_p} = -\frac{1}{2} - \frac{e_i^*}{e_p} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{e_i^*}{e_p} \right)^2 - \sqrt{6} \Psi_{11} + \sqrt{6 \Psi_{11}^2 + 4(1 - \Psi_{ij} \Psi_{ij})}}, \quad (13)$$

де e_i^* – накопичена деформація при формоутворенні заготовки;

$e_p = e_p(\zeta = 1)$ – пластичність металу при $\zeta = 1$; e_{p11} – залишкова пластичність при розтягуванні в напрямку x_1 .

Порівняння розрахунків використаного ресурсу пластичності.

Виконаємо розрахунок використаного ресурсу пластичності для низки шляхів деформування (рис. 1) для алюмінієвого сплаву АД33Т1. В якості розрахункових критеріїв використаємо залежності (3) і (6), (4) і (7), (5) і (8).

Розрахунок використаного ресурсу пластичності за критеріями (3), (4), (5 (Ψ_n)) [11] виконаємо з використанням апроксимації діаграми пластичності за В. А. Огородніковим [6]

$$e_p = e_{p0} \exp(-\lambda_{1,2} \eta), \quad (14)$$

де e_{p0} – пластичність металу при зсуві; $\lambda_{1,2}$ – чутливість пластичності металу до зміни схеми напруженого стану (λ_1 при $0 \leq \eta \leq 2$ і λ_2 при $-2 \leq \eta \leq 0$). А розрахунок використаного ресурсу пластичності за критеріями (6) – (8) (Ψ_ζ) – з використанням апроксимації (2).

Розбіжності у розрахунках визначимо по відношенню до Ψ_ζ у вигляді:

$$\Delta = \frac{\Psi_\zeta - \Psi_\eta}{\Psi_\zeta} 100\% \quad (15)$$

Результати розрахунків зведено до таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння розрахунків використаного ресурсу пластичності

Шляхи деформування на рис. 1	Розрахунки використаного ресурсу пластичності та похибок								
	Ψ_η (3)	Ψ_ζ (6)	$\Delta, \%$ (15)	Ψ_η (4)	Ψ_ζ (7)	$\Delta, \%$ (15)	Ψ_η (5)	Ψ_ζ (8)	$\Delta, \%$ (15)
1	0,92	0,57	-61	0,85	0,64	-33	0,96	0,68	-41
2	1,26	0,56	-125	0,92	0,87	-5,7	1,1	0,85	-29
3	1,19	0,73	-63	1,19	0,73	-63	1,19	0,73	-63
4	1	1	0	1	1	0	1	1	0
5	0,5	0,68	26	0,5	0,68	26	0,5	0,68	26
6	1	1	0	1	1	0	1	1	0
7	1,69	0,73	-131	1,69	0,73	-131	1,69	0,73	-131

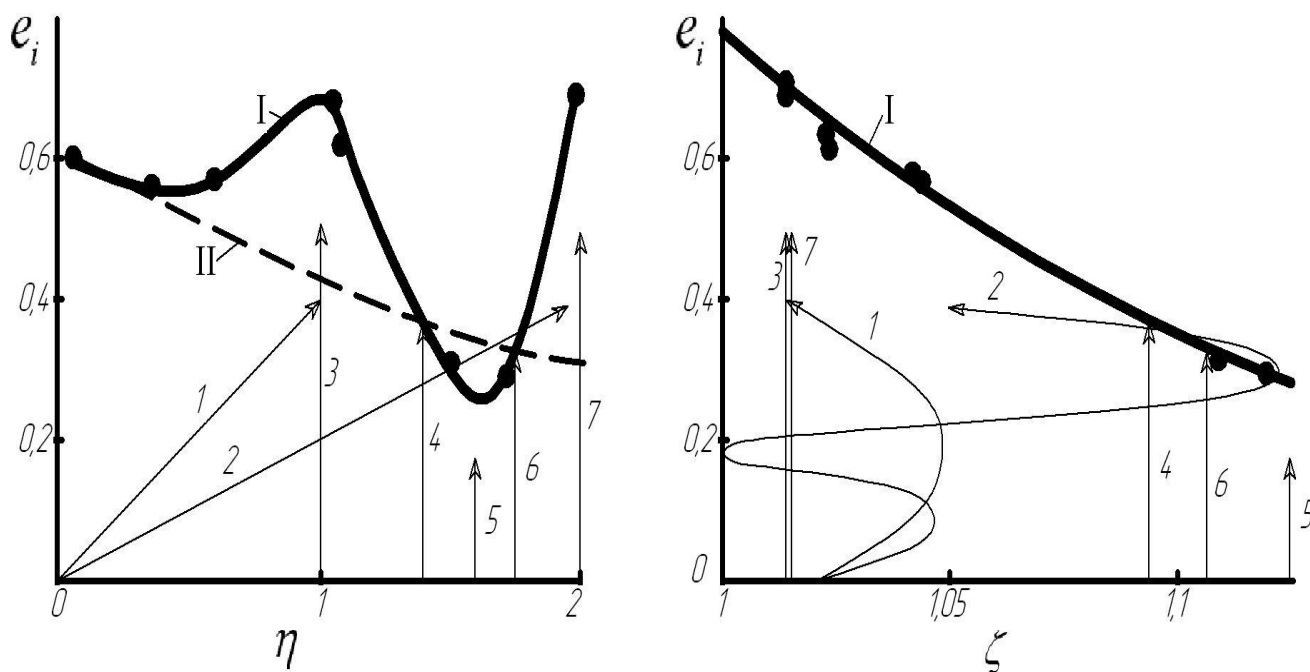


Рис. 1. Діаграми пластичності алюмінієвого сплаву 6061 (АД33Т1) і шляхи деформування в координатах аргументу η і ζ ($\bar{k}_2 = -0,063$, $\bar{k}_3 = -0,761$):

- I – діаграма пластичності – апроксимація (2);
- II – діаграма пластичності – апроксимація (11); 1–7 – шляхи деформування

При простих шляхах деформування використання моделей, побудованих на основі показника η та параметра ζ , дає розрахунок однакових значень використаного ресурсу пластичності у точках перетину діаграм пластичності та відповідних шляхів деформування (див. рис. 1, графіки 4, 6). Розрахунок використаного ресурсу пластичності при простих шляхах деформування з використанням аргументу η для сплаву АД33Т1 може як суттєво занижувати дійсні значення Ψ_η (див. рис. 1, графіки 3, 7), так і завищувати їх (див. рис. 1, графік 5).

Для дослідженого матеріалу параметр ζ змінюється у досить вузькому діапазоні від 1 до 1,2; отже, похідна, що характеризує історію деформування $d\zeta / de_i$, буде близька до нуля та її впливом при оцінці деформовності можна знехтувати. Це підтверджує розрахунок використаного ресурсу пластичності за критерієм, що не враховує історію (7) та враховує її (8). Так, для шляхів 1, 2 значення Ψ_ζ за (7) і (8) відрізняються несуттєво (див. табл. 2).

ВИСНОВКИ

Використання діаграми пластичності у вигляді залежності граничної деформації від параметру напруженого стану у відомих деформаційних критеріях для процесів, що протікають в області додатних гідростатичних тисків, може суттєво уточнити розрахунок використаного ресурсу пластичності – до 2-х разів, що, у свою чергу, дозволяє знизити ймовірність руйнування (до 50 %) в процесах холодного пластичного деформування (ХПД), параметри яких розраховані з мінімальними запасами за деформаціями руйнування, та розширити технологічні можливості процесів обробки металів тиском. Запропоновану апроксимацію у вигляді залежності граничної деформації від параметру напруженого стану рекомендується використовувати для оцінки деформовності матеріалу в процесах холодного листового штампування.

Зазначимо, що для перевірки та калібрування моделі використовувалися переважно дані для плоского та частково для вісесиметричного напруженого стану. При об'ємному напруженому стані перевірка вимагає проведення спеціальних експериментів у камері високого тиску. У цьому випадку об'ємність схеми можна врахувати показником, що містить третій інваріант тензора напружень [5].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев : Вища школа. Головное изд-во. 1983. 175 с.
2. Дель Г. Д. Технологическая механика. Москва : Машиностроение. 1978. 174 с.
3. Del G. D., Ogorodnikov V. A., Spiridonov L. K. Plasticity of metal subjected to complex loading. *Izv. Uchebn. Zaved. Mashinostroenie*. 1974. 12. pp. 22–26.
4. Dell H., Gese H., Oberhofer G. Crach FEM–A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. *AIP Conference Proceedings*. 2007. 908. May 17, pp. 165–170.
5. Огородников В. А., Кириця І. Ю., Перлов В. Є. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором: монографія. Вінниця: ВНТУ. 2015. 164 с.
6. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформация. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы): монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ. 2005. 204 с.
7. Грушко О. В., Гуцалюк О. В. Моделирование напруженого стану в процесах осесиметричного пластичного деформування із врахуванням карти матеріалів. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА. 2020. 1(50). С. 18-23.
8. Огородников В. А., Кириця И. Ю. Оценка деформируемости металла при формировании внутренних шлицевых поверхностей в глухих отверстиях методом холодного пластического деформирования. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА. 2020. 1(50). С. 136–146.
9. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ»*. Серія машинобудування. 2012. 64. С. 220–226.
10. Грушко А. В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2015. 348 с.
11. Кириця І. Ю. Феноменологічні критерії руйнування. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. 3. С. 75–81.

REFERENCES

1. Ogorodnikov V. A. Evaluation of the deformability of metals during pressure treatment. Kyiv : Higher school. Head publishing house. 1983. 175 p. *(in Russian)*
2. Del G. D. Technological mechanics. Moscow : Mechanical engineering. 1978. 174 p. *(in Russian)*
3. Del G. D., Ogorodnikov V. A., Spiridonov L. K. Plasticity of metal subjected to complex loading. *Izv. Uchebn. Zaved. Mashinostroenie*. 1974. 12. pp. 22–26.
4. Dell H., Gese H., Oberhofer G. Crach FEM–A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. *AIP Conference Proceedings*. 2007. 908. May 17, pp. 165–170.
5. Ogorodnikov V.A., Kyrytsia I.Yu., Perlov V.Ye. Mechanics of processes of cold plastic deformation of axisymmetric workpieces with a blind hole: monograph. Vinnytsia: VNTU. 2015. 164 p. *(in Ukrainian)*.
6. Ogorodnikov V. A., Kiselev V. B., Sivak I. O. Energy. Deformation. Destruction (tasks of autotechnical expertise): monograph. Vinnitsa: UNIVERSUM. 2005. 204 p. *(in Russian)*
7. Hrushko O.V., Gutsalyuk O.V. Modeling of the stress state in the processes of axisymmetric plastic deformation taking into account the material map. *Materials working by pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1(50), pp. 18–23. *(in Ukrainian)*.
8. Ogorodnikov V. A., Kyrytsia I. Yu. Estimation of deformability of metal during the formation of internal slotted surfaces in blind holes by the method of cold plastic deformation. *Materials working by pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1(50), pp. 136–146. *(in Russian)*
9. Grushko A. V. Parameter of the stress state, taking into account the properties of the material, and its influence on plasticity. *Journal of Mechanical Engineering NTUU “KPI”*. 2012. 64, pp. 220–226. *(in Russian)*
10. Grushko A.V. Maps of materials in cold forming: monograph. Vinnitsa : VNTU. 2015. 348 p. *(in Russian)*.
11. Kyrytsia I.Yu. Phenomenological criteria of destruction. *Herald of the Khmelnytskyi National University*. 2022. 3, pp. 75–81. *(in Ukrainian)*.

Hrushko O., Kyrytsia I. Criteria of deformity taking into account the properties of the material in the parameter of the stress state

The non-monotonic behavior of the plasticity of materials in the area of positive hydrostatic pressure depending on the classical indicator of the stress state leads to the need to find better parameters as an argument of the plasticity diagram. In this article, parameter of the stress state is proposed, which depends on the physical and mechanical properties of the material. Influence coefficients are mechanical properties of the material. The plasticity diagram in the metal map, with the help of the entered stress state parameter, is proposed to be approximated by a monotonically decreasing exponential function. It was established that the influence of the principal normal stresses is unequal in relation to the accumulation of damage in the plastically deformed material. Moreover, this influence depends on the type of material, which makes it possible to form a plasticity model, in particular for materials with different rheology. It was established that the influence factor of the third relative principal stress for low-carbon steels, aluminum and titanium alloys is 0,76...0,85.

It is recommended to use the parameter of the stress state proposed by us as an argument of the plasticity diagram in known models of deformability, since this parameter does not change the physical content of damage accumulation. The scope of application of this or that criterion remains in accordance with the recommendations for its use, depending on the type of process and load history. A comparative calculation of the used plasticity resource was performed according to known criteria and criteria that take into account the properties of the material through the stress state parameter. The use of a plasticity diagram constructed using the proposed stress state parameter for cold plastic deformation processes that occur in the region of positive hydrostatic pressure, depending on the type of deformation path and the features of metal rheology, clarifies the value of the used metal plasticity resource up to 2 times, which allows to reduce the number of defective products up to 50% for processes whose regimes are calculated by limit deformations.

Keywords: cold plastic deformation, plasticity, stress state parameter, plasticity diagram, deformability criteria, used plasticity resource.

Грушко А. В., Кирица И. Ю. Критерии деформируемости с учетом свойств материала в параметре напряженного состояния

Немонотонность поведения пластичности материалов в области положительных гидростатических давлений в зависимости от классического показателя напряженного состояния приводит к необходимости поиска более удачных параметров в качестве аргумента диаграммы пластичности. В данной работе предложен параметр напряженного состояния, зависящий от физико-механических свойств материала. Коэффициенты влияния являются механическими свойствами материала. Диаграмму пластичности в карте металла с помощью введенного параметра напряженного состояния предлагается аппроксимировать монотонно убывающей экспоненциальной функцией. Установлено, что влияние главных нормальных напряжений неодинаково относительно накопления повреждений в пластически деформируемом материале. Причем, данное влияние зависит от вида материала, что дает возможности формирования модели пластичности, в частности для материалов с разной реологией. Установлено, что коэффициент влияния третьего относительного главного напряжения для малоуглеродистых сталей, алюминиевых и титановых сплавов составляет – 0,76...0,85.

Рекомендуется в известных моделях деформируемости применять в качестве аргумента диаграммы пластичности предложенный нами параметр напряженного состояния, поскольку физического смысла накопления повреждений данный параметр не изменяет. Область применения того или иного критерия остается в соответствии с рекомендациями использования в зависимости от вида процесса и истории нагружения. Выполнен сравнительный расчет использованного ресурса пластичности по известным критериям и критериям, учитывающим свойства материала через параметр напряженного состояния. Использование диаграммы пластичности, построенной с помощью предложенного показателя напряженного состояния, для процессов холодного пластического деформирования, протекающих в области положительного гидростатического давления, в зависимости от вида пути деформирования и особенностей реологии металла уточняет значение использованного ресурса пластичности металла до 2-х раз, что позволяет уменьшить количество брака изделий до 50 % для процессов, режимы которых рассчитаны по предельным деформациям.

Ключевые слова: холодное пластическое деформирование, пластичность, параметр напряженного состояния, диаграмма пластичности, критерии деформируемости, использованный ресурс пластичности.

Грушко Олександр Володимирович – д-р техн. наук, проф. ВНТУ
Hrushko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, VNTU
Грушко Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф. ВНТУ
E-mail: grushko1alex@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5551-375X>

Кириця Інна Юрїївна – канд. техн. наук, доц. ВНТУ
Kyrytsia Inna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, VNTU
Кириця Инна Юрьевна – канд. техн. наук, доц. ВНТУ
E-mail: kyrytsya@vntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8280-5552>

ВНТУ – Винницький національний технічний університет, г. Вінниця
ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
VNTU – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Стаття надійшла до редакції 10.04.22 р.