

УДК 621.73.011.001.5

Р. І. Сивак¹, В. А. Огородніков², І. О. Сивак²

ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРУЖЕНЬ ПРИ НЕМОНОТОННІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

Вінницький національний аграрний університет¹
Вінницький національний технічний університет²

В статті запропоновано використання моделі тіла, що анізотропно зміцнюється, запропонованої Г. Бакгаузом для визначення напружено-деформованого стану в процесі радіального видавлювання з наступним осадом.

ВСТУП

При немонотонному навантаженні процес накопичення пошкоджень описують тензорними моделями [1, 2]. При цьому напружений стан визначають виходячи із моделі ізотропного зміцнення металу, яка не враховує вплив ефекту Баушингера і, в силу цього, є непридатною для кількісного описання процесів немонотонного деформування. В даний час розв'язок крайової задачі теорії пластичності в загальній постановці для немонотонного навантаження не отримано. Тому в даній роботі розглядається модель анізотропного зміцнення металу при пластичній деформації запропонована Г. Бакгаузом [3], а також приводяться експериментальні залежності параметрів, що описують ефект Баушингера і спадковий вплив історії навантаження на процес пластичного деформування. При цьому кінематичні характеристики процесу пластичної деформації визначаються експериментально-розрахунковим методом координатних сіток.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Компоненти девіатора напружень при немонотонній пластичній деформації розраховували за формулою [4,5]:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{\dot{e}_{ij}}{\dot{e}_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} (1 - \beta(e_u^*)) \sigma_u(e_u^*) \varphi(e_u^* - e_u^0) \frac{d^2 e_{ij}(e_u^*)}{de_u^2} de_u^*, \quad (1)$$

де $\sigma_u(e_u)$ – крива течії, $\dot{e}_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{e}_\varphi - \dot{e}_r)^2 + (\dot{e}_r - \dot{e}_z)^2 + (\dot{e}_z - \dot{e}_\varphi)^2} + \frac{2}{3} \dot{\gamma}_{rz}^2$ – інтенсивність швидкостей деформацій.

В цій роботі немонотонність пластичної деформації обумовлена тим, що осесиметричні стовщення отримані шляхом послідовної формозміни циліндричних заготовок в процесі радіального видавлювання з наступним контурним осадом.

Для визначення компонент тензора швидкостей деформацій \dot{e}_{ij} , які входять в формулу (1), нами використано метод координатних сіток. При дослідженні нестационарного процесу пластичної формозміни процес деформування розбивали на ряд етапів, на кожному з яких експеримент переривали, заготовку витягували із пристрою і заміряли координати вузлів деформованої сітки, нанесеної на меридіональний переріз заготовки. Експериментальні дані представляли у вигляді таблично заданих функцій (масивів) поточних (ейлерових) координат z, r від початкових (лагранжевих) координат z_0, r_0 і часу (номера етапу деформування). Потім заготовку вставляли в пристрій і деформували до наступного етапу. Крім того, використовували декілька заготовок з однаковою вихідною сіткою, які деформували до різних етапів.

Компоненти тензора швидкостей деформацій визначали за спотвореною координатною сіткою, нанесеною на меридіональний переріз, за формулами [6]:

$$\dot{e}_r = \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} \right],$$

$$\dot{e}_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\dot{e}_z = \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} \right],$$

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} + \frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 r}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} \right].$$

Функції ейлерових координат від лагранжевих $z(z_0, r_0, t)$ і $r(z_0, r_0, t)$ отримували шляхом апроксимації експериментальних даних кубічними сплайнами. Роль критерію якості апроксимації у цьому випадку виконує функціонал [7]:

$$I_1(S) = \int_{x_1}^{x_N} |S''(x)|^2 dx + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\rho_i} (f_i - S(x_i))^2, \quad (3)$$

де f_i – значення функції, що згладжується у вузлі, $\rho_i \geq 0$ – ваговий коефіцієнт, x_1 і x_N – границі області визначення функції $f(x)$.

Для одержання апроксимації експериментальних даних, що мають найменше відхилення від умови нестисливості:

$$\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial z}{\partial z_0} - \frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial z}{\partial r_0} = \frac{r_0}{r} \quad (4)$$

використовували ітераційний вибір вагових коефіцієнтів сплайна. Початкове наближення будували з нульовими ваговими коефіцієнтами сплайна $\rho_0^{ij} = 0$. Потім реалізували ітераційний процес:

$$\rho_{k+1}^{ij} = \left(\frac{\delta_{Dk}^{ij}}{\delta_k} \right)^2 \rho, \quad (5)$$

де δ_D – базова похибка виконання умови нестисливості, яку приймали рівною 0,05, ρ – базовий коефіцієнт згладжування (в результаті чисельних експериментів встановлено, що найменша середня похибка досягається при $\rho=0.1 \dots 0.01$), k – номер ітерації.

В i, j -ому вузлі точність виконання умови (4) визначали за виразом:

$$\delta_D^{ij} = \left[\frac{r}{r_0} \left(\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial z}{\partial z_0} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial z}{\partial r_0} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

Характеристики матеріалу $\beta(e_u)$ і $\varphi(e_u - e_u^0)$ визначали експериментально. При цьому вважали справедливою гіпотезу, що функції $\beta(e_u)$ і $\varphi(e_u - e_u^0)$ не залежать від напруженого стану та історії деформування. В зв'язку з цим, характеристики немоного навантаження визначали в умовах лінійного напруженого стану [4, 5].

Залежності $\beta(e_u)$ і $\varphi(e_u - e_u^0)$ для сталі 10 визначали за методикою Д. В. Хвана [4]. Для цього використовували стандартні зразки, які на першому етапі розтягували до залишкових деформацій 0,02; 0,03; 0,062. Потім із zdeформованих зразків вирізали короткі циліндричні зразки, які осаджували і будували відповідні діаграми $\sigma_p(e_u)$. Параметр β , який характеризує ефект Баушингера, визначали за формулою:

$$\beta = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u(e_u^0)}, \quad (7)$$

де $\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості при стиску зразка після його розтягу до деформації e_u^0 якій

відповідає напруження $\sigma_u(e_u^0)$.

Експериментальні залежності параметра Баушингера $\beta(e_u)$ від e_u для сталі 10 наведені на рис. 1. Результати експериментальних досліджень показують, що параметр β сильно залежить від накопиченої деформації e_u при $e_u \leq 0,05$, а при $e_u > 0,05$, цей параметр для більшості металів залишається сталим і приймає деяке значення β_m [4,5]. Для сталі 10 $\beta_m = 0,34$ (рис. 1).

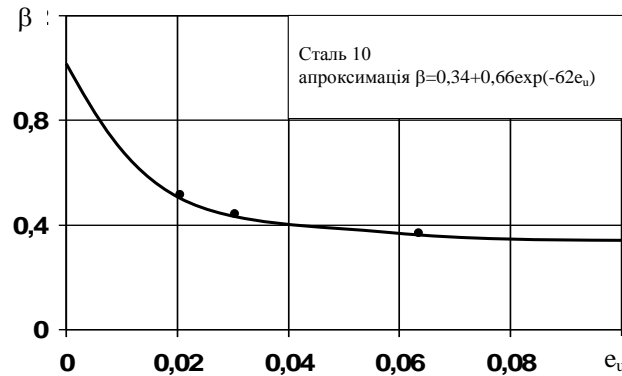


Рисунок 1 – Залежність параметра β від e_u

Залежність β від e_u апроксимували формулою [4]:

$$\beta = \beta_m + (1 - \beta_m) \exp(c \cdot e_u). \quad (8)$$

Використовуючи метод найменших квадратів для сталої c , отримали значення: $c = -62$.

Функцію φ , яка дозволяє врахувати спадковий вплив історії деформування на даний стан матеріалу при пластичній деформації, визначали також за результатами досліджень циліндричних зразків на розтяг і наступний стиск. При цьому її значення визначали за формулою [4, 5]:

$$\varphi(e_u - e_u^0) = \frac{\sigma_p(e_u) - |\sigma_c(e_u)|}{\sigma_p(e_u^0)(1 - \beta(e_u^0))}, \quad (9)$$

де e_u^0 – накопичена деформація, при досягненні якої має місце розвантаження або злом траєкторії деформування, $\sigma_p(e_u)$ – напруження при монотонному розтягу, $\sigma_c(e_u)$ – напруження при стиску зразків до деформації e_u , попередньо розтягнутих до e_u^0 напруженням $\sigma_p(e_u^0)$, $\beta(e_u^0)$ – значення параметра Баушингера при $e_u = e_u^0$.

Експериментальні значення φ , визначали за формулою (9) і апроксимували згідно з рекомендаціями Д. В. Хвана [4] залежністю:

$$\varphi(e_u - e_u^0) = \varphi_0 + (1 - \varphi_0) \exp(c_1(e_u - e_u^0)^{c_2}), \quad (10)$$

де φ_0 – асимптотичне значення, яке визначали експериментально (для сталі 10 - $\varphi_0 = 0,19$).

Коефіцієнти c_1 і c_2 визначали методом найменших квадратів і отримали такі значення: для сталі 10 $c_1 = -22,3$; $c_2 = 0,806$.

Експериментальні значення $\varphi(e_u - e_u^0)$ і апроксимуюча крива наведені на рис. 2.

Компоненти девіатора напружень розраховували за формулою (1). Гідростатичне напруження σ визначали шляхом інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги, які при осесиметричній деформації мають вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0. \quad (12)$$

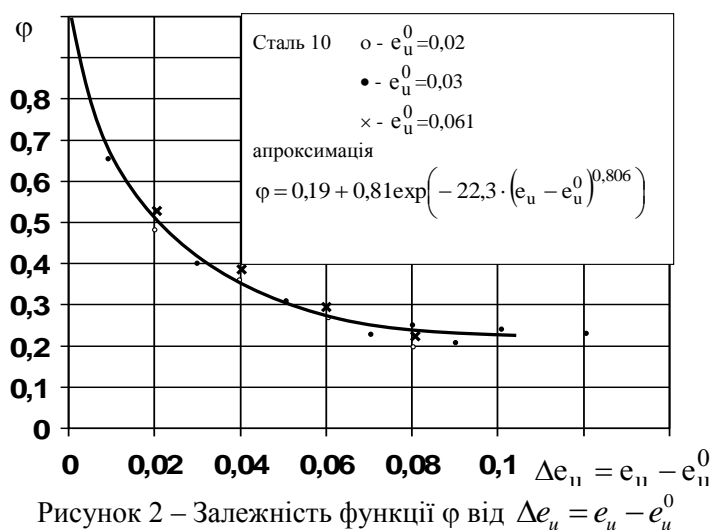


Рисунок 2 – Залежність функції φ від $\Delta e_u = e_u - e_u^0$

При цьому також використовували інтегральне рівняння рівноваги:

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma_z r dr, \quad (13)$$

де r – радіус тіла, що деформується; P – зусилля, яке визначається при деформуванні досліджуваного тіла.

$$\sigma_r = (\sigma_r)_A + \int_r^R \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{S_r - S_\varphi}{r} \right) dr, \quad (14)$$

де $(\sigma_r)_A$ – радіальне напруження в точці А, яка знаходиться на зовнішній поверхні заготовки. Осьове напруження дорівнює:

$$\sigma_z = S_z + \sigma_r - S_r \quad (15)$$

Після підстановки (15), (14) у (13) находимо:

$$(\sigma_r)_A = \frac{1}{\pi R^2} \left(P - 2\pi \int_0^R (S_z - S_r + S) r dr \right), \quad (16)$$

$$S = \int_r^R \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{S_r - S_\varphi}{r} \right) dr. \quad (17)$$

Для визначення напружень в інших точках радіуса використовували рівняння (14) у вигляді:

$$(\sigma_r)_i = (\sigma_r)_{i+1} + \int_{r_{i+1}}^{r_i} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{S_r - S_\varphi}{r} \right) dr. \quad (18)$$

Напруження σ_z і σ_φ розраховували вздовж радіуса за формулами:

$$\begin{aligned} (\sigma_z)_i &= (\sigma_r)_i - (S_r)_i + (S_z)_i, \\ (\sigma_\varphi)_i &= (\sigma_r)_i - (S_r)_i + (S_\varphi)_i. \end{aligned} \quad (19)$$

Аналогічно розраховували напруження вздовж інших паралельних радіусів. Значення осьових напруження σ_z вздовж вертикальних ліній визначали шляхом інтегрування другого диференціального рівняння рівноваги (12):

$$(\sigma_z)_{i+1} = (\sigma_z)_i - \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right) dz. \quad (20)$$

На рис. 3 наведені отримані залежності нормальних напружень σ_z , σ_r і σ_φ від ступеня деформації e_u в точках, які перед деформуванням займали положення показані на рис. 3 ($z = 0$).

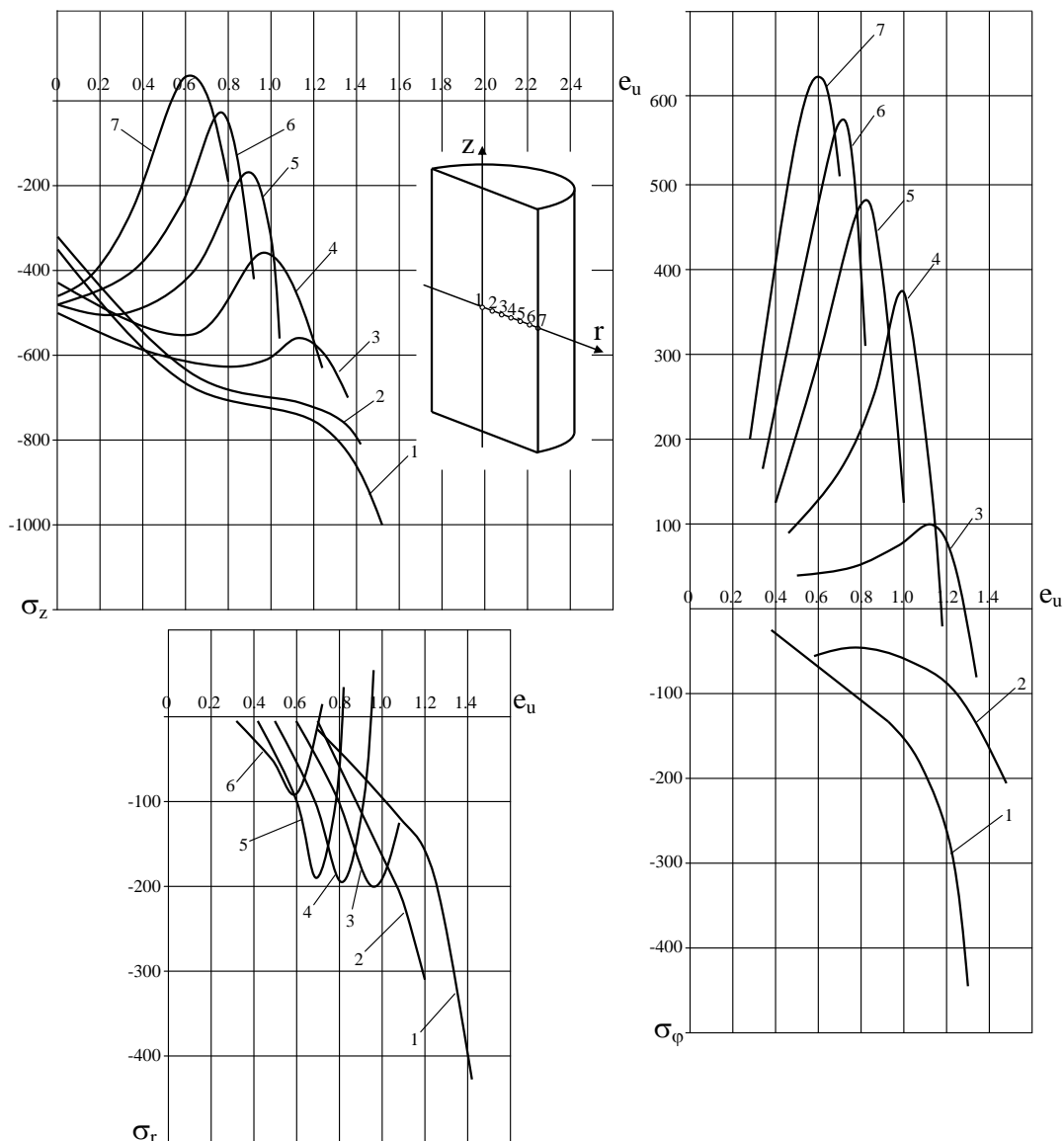


Рисунок 3 – Залежності σ_z , σ_r і σ_φ від e_u в точках 1-7

З аналізу наведених на рис. 3 залежностей нормальних напружень σ_z , σ_r і σ_φ від ступеня деформації e_u випливає, що при переході від радіального видавлювання до контурного осадку характер

цих залежностей різко змінюється, чого практично не спостерігається при використанні фізичних рівнянь теорії течії.

Причому немонотонність навантаження тим більше впливає на характер кривих, що описують залежність напружень від ступеня деформації, чим ближче досліджувана точка до поверхні заготовки. Тому при дослідженні впливу поля напружень та закономірностей їх зміни на деформівність й інші характеристики здеформованого металу необхідно враховувати анізотропію механічних характеристик металу, обумовлену немонотонною пластичною деформацією.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянута модель тіла, що анізотропно зміцнюється, запропонована Г. Бакгаузом. Отримані експериментальні залежності для параметра Баушінгера $\beta(e_u)$ і функції $\varphi(e_u - e_u^0)$, яка дозволяє враховувати спадковий вплив історії деформування на даний стан матеріалу при немонотонній пластичній деформації для сталі 10. Визначено напружено-деформований стан в точках, що знаходяться на горизонтальній осі симетрії заготовки для процесу радіального видавлювання з наступним осадом. При цьому кінематичні характеристики процесу пластичної деформації визначені експериментально-розрахунковим методом координатних сіток. Встановлено, що немонотонність навантаження значно впливає на характер кривих, які описують залежність напружень від ступеня деформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1982. – № 11. – С. 28–32.
2. Михалеви́ч В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалеви́ч. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 195 с.
3. Backhaus G. Zur analytischen Darstellung des Materialverhaltens im plastischen Bereich / G. Backhaus // ZAMM. – 1971. – № 51. – P. 471–477.
4. Хван Д. В. Экспериментальная механика конечных деформаций / Д. В. Хван, Ф. Х. Томилов, В. И. Корольков. – Воронеж : ЭЛИСТ, 1996. – 248 с.
5. Сивак Р. И. Влияние немонотонности пластической деформации на напряжённое состояние / Р. И. Сивак, О. В. Сердюк, И. О. Сивак // Обработка металлов давлением : сб-к научн. трудов. – Краматорск : ДГМА. – № 2(23). – 2010. – С. 3–7.
6. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. – Винниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
7. Завьялов Ю. С. Методы сплайн-функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М. : Наука, 1980. – 352 с.
8. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.

REFERENCES

1. Del G. D. Plasticity of the deformed metal / G. D. Del // Physika i tekhnika vysokikh davleniy. – 1982. – № 11. – P. 28–32 (Rus.).
2. Mikhalevich V. M. Tensor models of failure accumulation / V. M. Mikhalevich. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 1998. – 195 p. (Ukr.).
3. Backhaus G. Zur analytischen Darstellung des Materialverhaltens im plastischen Bereich / G. Backhaus // ZAMM. – 1971. – № 51. – P. 471–477.
4. Khvan D. V. Experimental mechanics of limit deformations / D. V. Khvan, F. Kh. Tomilov, V. I. Korolkov. – Voronezh : ELIST, 1996. – 248 p.
5. Syvak R. I. Influence of the non-monotony of plastic deformation on the stressed state / R. I. Syvak, O. V. Serdiuk, I. O. Syvak // Obrabotka metala davleniyem : collection of scientific works. – Kramatorsk : DGMA. – № 2 (23). – 2010. – P. 3–7.
6. Ogorodnikov V. A. Energy. Deformations. Damage (problems of automotive technical expertise) / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiseliov, I. O. Syvak. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2005. – 204 p.
7. Zavialov Y. S. Methods of spline-functions / Y. S. Zavialov, B. I. Kvasov, V. L. Miroshnichenko. – M.: Nauka, 1980. – 352 p.
8. Del G. D. Technological mechanics / G. D. Del. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 174 p.

Р. І. Сивак¹, В. А. Огородніков², І. О. Сивак²**ВИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРУЖЕНЬ ПРИ НЕМОНОТОННІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ**Вінницький національний аграрний університет¹
Вінницький національний технічний університет²

В статті запропоновано використання моделі тіла, що анізотропно зміцнюється, запропонованої Г. Бакгаузом, для визначення напружено-деформованого стану в процесі радіального видавлювання з наступним осадом.

Об'єкт дослідження – пластична деформація тіла, що анізотропно зміцнюється, при немонотонному навантаженні.

Мета роботи – визначення величини та закономірностей зміни компонент тензора напружень при немонотонній пластичній деформації.

Теорія пластичності тіла, що ізотропно зміцнюється, непридатна для кількісного описання процесів немонотонного деформування. Крім того, багато особливостей поведінки матеріалу при складному навантаженні можна розглядати як проявлення ефекту Баушингера. Для врахування цих особливостей необхідне використання відповідних фізичних рівнянь.

В даній роботі для врахування анізотропії деформаційного зміцнення використано модель запропоновану Г. Бакгаузом. Отримані експериментальні залежності для функції $\varphi(e_u - e_u^0)$, яка дозволяє враховувати спадковий вплив історії деформування на даний стан матеріалу при немонотонній пластичній деформації і для параметра Баушингера $\beta(e_u)$. Встановлено, що для сталі 10 параметр β і функція $\varphi(e_u - e_u^0)$ сильно залежать від накопиченої деформації e_u при $e_u \leq 0,05$, а при $e_u > 0,05$, ці параметри залишаються практично сталими.

Для процесу радіального видавлювання з наступним осадом визначено напружено-деформований стан в точках, що лежать на горизонтальній осі симетрії заготовки. Для визначення кінематичних характеристик процесу пластичної деформації використано експериментально-розрахунковий метод координатних сіток. Встановлено, що немонотонність пластичної деформації значно впливає на характер кривих, що описують залежність напружень від ступеня деформації. Використання запропонованої в нашій роботі методики дозволяє значно підвищити точність розрахунків компонент тензора напружень та законів їх зміни.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАПРУЖЕННЯ, ДЕФОРМАЦІЇ, АНІЗОТРОПІЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ, ЕФЕКТ БАУШИНГЕРА, НАКОПИЧЕНА ДЕФОРМАЦІЯ.

Сивак Роман Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний аграрний університет, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці ВНАУ, e-mail: sivak_r_i@mail.ru, тел. +380660881336, Україна, 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 5, кв. 44.

Огородніков Віталій Антонович, доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, тел. +380675897115, Україна, 21027, м. Вінниця, вул. Келецька 59, кв.117.

Сивак Іван Онуфрійович, доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри технології та автоматизації машинобудування ВНТУ, e-mail: sivak_i_o@mail.ru, тел. +380677127058, Україна, 21030, м. Вінниця, вул. Стахурського 72, кв. 39.

DETERMINATION OF THE STRESS TENSOR COMPONENTS UNDER NON-MONOTONIC PLASTIC DEFORMATION

Vinnitsia National Agricultural University¹
Vinnitsia National Technical University²

The paper proposes application of the model of anisotropically changing body, proposed by G. Backhaus, to determine the stress-strain state in the process of radial extrusion with subsequent upsetting.

The object of the study is plastic deformation of the body, changing anisotropically under non-monotonic load.

The purpose of the study is determination of the value and regularities of the stress tensor components variations under non-monotonic plastic deformation.

Plasticity theory for the body, that in changing anisotropically, is not suitable for quantitative description of non-monotonic deformation processes. Besides, many material behavior features can be considered as Bauschinger effect manifestations. In order to take these features into account, the corresponding physical equations should be used.

This paper uses the model, proposed by G. Backhaus, for taking into account the anisotropy of strain hardening. Experimental dependencies have been obtained for function $\varphi(e_u - e_u^0)$, which makes it possible to take into account the inherited influence of deformation history on the current state of material under non-monotonic deformation also for Bauschinger parameter $\beta(e_u)$. It has been found that for steel 10 parameter β and function $\varphi(e_u - e_u^0)$ depend strongly on the accumulated deformation e_u for $e_u \leq 0,05$, and for $e_u > 0,05$ these parameters remain practically stable.

For the process of radial extrusion with subsequent upsetting the stress-strain state has been determined in the points located on the horizontal axis of symmetry of the workpiece. For determining kinematic characteristics of the plastic deformation process, an experimental-calculation method of coordinate grids is used. It has been found that non-monotony of plastic deformation has a strong influence on the character of curves describing dependence of stresses on the deformation degree. Application of the procedure, proposed in this work, enables considerable improvement of the accuracy in calculations of stress tensor components and the laws of their variations.

KEYWORDS: STRESS, DEFORMATIONS, ANISOTROPY OF STRAIN HARDENING, BAUSCHINGER EFFECT, ACCUMULATED DEFORMATION.

Syvak Roman I. – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of General Technical Disciplines and Labor Protection, Vinnitsia National Agricultural University, e-mail: sivak_r_i@mail.ru, phone: +380660881336, Ukraine, 21008, Vinnitsia, Soniachna 5, ap. 44.

Ogorodnikov Vitalii A. – Dr. Sc. (Eng.), Professor, the Head of the Chair of Strength of Materials and Applied Mechanics, Vinnitsia National Technical University, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, phone: +380675897115, Ukraine, 21027, Vinnitsia, Keletskaya 59, ap. 32.

Syvak Ivan O. – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Machine-Building Technology and Automation, Vinnitsia National Technical University, e-mail: sivak_i_o@mail.ru, phone: +380677127058, Ukraine, 21030, Vinnitsia, Stakhurskogo 72, ap. 39.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕМОНОТОННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Винницкий национальный аграрный университет¹
Винницкий национальный технический университет²

В статье предложено использовать модель анизотропно упрочняющегося тела, которая была предложена Г. Бакгаузом, для определения напряженно-деформированного состояния в процессе радиального выдавливания с последующей осадкой.

Объект исследования – пластическая деформация анизотропно упрочняющегося тела, при немонотонном нагружении.

Цель работы – определение величины и закономерностей изменения компонент тензора напряжений при немонотонной пластической деформации.

Теория пластичности анизотропно упрочняющегося тела непригодна для количественного описания процессов немонотонного деформирования. Кроме того, много особенностей поведения материала при сложном нагружении можно рассматривать как проявление эффекта Баушингера. Для учета этих особенностей необходимо использование соответствующих физических уравнений.

В данной работе для учета анизотропии деформационного упрочнения использована модель предложенная Г. Бакгаузом. Полученные экспериментальные зависимости для функции $\varphi(e_u - e_u^0)$, которая позволяет учитывать наследственное влияние истории деформирования на данное состояние материала при немонотонной пластической деформации и для параметра Баушингера $\beta(e_u)$. Установлено, что для стали 10 параметр β и функция $\varphi(e_u - e_u^0)$ сильно зависят от накопленной деформации e_u при $e_u \leq 0,05$, а при $e_u > 0,05$, эти параметры остаются практически постоянными.

Для процесса радиального выдавливания с последующей осадкой определено напряженно-деформированное состояние в точках, которые лежат на горизонтальной оси симметрии заготовки. Для определения кинематических характеристик процесса пластической деформации использован экспериментально-расчетный метод координатных сеток. Установлено, что немонотонность пластической деформации значительно влияет на характер кривых, описывающих зависимость напряжений от степени деформации. Использование предложенной в данной работе методики позволяет значительно повысить точность расчетов компонент тензора напряжений и законов их изменения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ, АНИЗОТРОПИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ, ЭФФЕКТ БАУШИНГЕРА, НАКОПЛЕННАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

Сивак Роман Иванович, кандидат технических наук, доцент, Винницкий национальный аграрный университет, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда ВНАУ, e-mail: sivak_r_i@mail.ru, тел. +380660881336, Украина, 21008, г. Винница, ул. Солнечная, 5, кв. 44.

Огородников Виталий Антонович, доктор технических наук, профессор, Винницкий национальный технический университет, заведующий кафедрой сопротивления материалов и прикладной механики ВНТУ, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru, тел. +380675897115, Украина, 21027, г. Винница, ул. Келецкая 59, кв.117.

Сивак Иван Онуфриевич, доктор технических наук, профессор, Винницкий национальный технический университет, заведующий кафедрой технологии и автоматизации машиностроения ВНТУ, e-mail: sivak_i_o@mail.ru, тел. +380677127058, Украина, 21030, г. Винница, ул. Стахурского 72, кв. 39.