

ло, В.Е. Гримани // Защита металлургических машин от поломок: Сб. научн. тр. – Вып.3. – Мариуполь, 1998. 3. Компенсатор похибок напряму переміщення повзуна преса [Текст]: пат. 11782 Україна, МПК6 В 21 В 23/00 / Діамантопуло К.К., Кухар В.В., Єрмолов Д.В.; заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет. – № u200505677; заяв. 13.06.2005; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 4с., іл. 4. Компенсатор похибок [Текст]: пат. 837 Україна, МПК6 В 21 В 23/00 / Діамантопуло К.К., Василевський О.В.; заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет. – № 200004673; заяв. 06.12.2000; опубл. 14.11.2001, Бюл. №11 – 2с., іл. 5. Універсальний компенсатор похибок напряму повзуна [Текст]: пат. 38814 Україна, МПК(2006) В 30 В 15/28; В 21 В 23/00 / Кухар В.В., Балалаєва О.Ю., Макєєв В.С.; заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет. – № u20086973; заяв. 20.05.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. №2. – 4с., іл. 6. Спосіб кріплення верхньої плити штампа до повзуна преса [Текст]: пат. 37242 Україна, МПК(2006) В 30 В 15/28 / Кухар В.В., Діамантопуло К.К., Лаврентік О.О., Балалаєва О.Ю., Макєєв В.С.; заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет. – № u200806345; заяв. 13.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. – 3с. 7. Діамантопуло К.К. Опыт эксплуатации кольцевого компенсатора погрешностей направления ползуна кривошипного преса / К.К. Діамантопуло, В.В.Кухарь, Е.Ю. Балалаєва, А.И. Евтеев // Теория и практика листового проката: Сб. научн. тр. Часть 1. – Липецк: ЛГТУ, 2008. – С.176-182. 7. Спосіб кріплення верхньої плити штампа до повзуна преса [Текст]: висновок про видачу деклараційного патенту на корисну модель № 38322 від 07.09.09 Україна, МПК(2006) В 30 В 15/28 / Кухар В.В., Балалаєва О.Ю., Діамантопуло К.К., Тузенко О.О., Процько Д.М.; заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет. – № u200906825; заяв. 30.06.2009. 8. Балалаєва Е.Ю. Исследование деформации кольцевого упругого компенсатора при работе системы «пресс-штамп» с перекосами ползуна / Е.Ю. Балалаєва, В.В. Кухарь // Обработка материалов давлением: Сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2009. – №1(20). – С.295–300. 9. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1979. – 400 с., ил. 10. Тарновский И.Я. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго, В.Л. Колмогоров, В.Н. Трубин, Р.А. Вайсбурд, В.И. Тарновский. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с. 11. Шофман Л.А. Основы расчета процессов штамповки и прессования / Л.А. Шофман. – М.: Машгиз, 1961. – 340 с. 12. Кушнарєнко С.Г. Исследование напряжений в клеевом слое клееклепаных соединений / С.Г. Кушнарєнко, В.А. Матвиєнко, А.И. Зирка, Е.И. Поздняков // Обработка материалов давлением в машиностроении. - Вып.17. – Харьков: Вища школа, 1979. – С.55-58. 13. Данченко В.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, А.Н. Головка. – Днепрпетровск: «Системные технологии», 2002. – 448 с. 14. Каргин Б.С. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Теория кузнечно-штамповочного производства» / Б.С. Каргин, П.П. Омельченко. – Мариуполь: ПГТУ, 2003. – 48 с. 15. Еднерал П.П. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением / П.П. Еднерал, И.Г. Константинов. – М.: Машгиз, 1960. – 334 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.7

МИХАЛЕВИЧ В. М., докт. техн. наук, проф., ВНТУ, м. Вінниця
КРАЄВСЬКИЙ В. О., канд. техн. наук, доц., ВНТУ, м. Вінниця
ДОБРАНЮК Ю. В., аспірант, ВНТУ, м. Вінниця

МОДЕЛЮВАННЯ ГРАНИЧНИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСАХ ТА ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

Розглянуто задачу апроксимації експериментальних даних, необхідних для визначення накопиченої деформації за умов складного деформування, що має місце на вільній бічній поверхні під час вісесиметричного осадження циліндричних зразків за різних умов тертя на торцях.

Ключові слова: осадка циліндричних зразків; апроксимація деформацій, накопичена деформація.

Рассмотрена задача аппроксимации экспериментальных данных, необходимых для определения накопленной деформации при условиях сложного деформирования, которое имеет место на свободной боковой поверхности во время осесимметрической осадки цилиндрических образцов при разных условиях трение на торцах.

Ключевые слова: осадка цилиндрических образцов; аппроксимация деформаций, накопленная деформация.

The problem of the experimental data's approximation, necessary for accumulate strain's definition under conditions of complex strain which occur on a free lateral surface during axial-symmetric compression of cylindrical samples under different conditions of friction at the end faces is considered in details.

Keywords: compression of cylindrical patterns; approximation of strains, accumulate strain.

Вступ

У роботі [1] розроблена експериментально-аналітична методика визначення напружено-деформованого стану на бічній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження між плоскими плитами. Експериментальна частина цієї методики була широко розвинута в чисельних роботах, зокрема [2, 3, 4]. Що ж стосується аналітичної частини методики визначення напружено-деформованого стану, то вона не тільки не вдосконалювалася, а взагалі залишилася фактично непоміченою. Метою даної роботи є розробка інформаційних технологій визначення деформованого стану, формулювання і аналіз оптимізаційних задач при визначенні граничних деформацій для окремих класів нестационарного деформування.

Основна частина

Залежність між осьовою та коловою деформаціями, які отримані експериментально, $\varepsilon_z = f(\varepsilon_\varphi)$ можна апроксимувати декількома виразами. Однією із них є апроксимація у вигляді розв'язку диференціального рівняння з відокремленими змінними [1]

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{m^2}{\varepsilon_\varphi^2 + m^2}. \quad (1)$$

Авторами запропоновано альтернативні залежності:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p^2}{\varepsilon_z^2 + p^2}, \quad (2)$$

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot e^{-m \cdot \varepsilon_\varphi}. \quad (3)$$

Розроблено методику визначення констант m і p на основі експериментальних даних.

Диференціальні рівняння (1) – (3) задовольняють наступні ключові умови: а)

$$-2 \leq \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} < -\frac{1}{2}; \quad (4)$$

б) значення похідної $\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi}$ монотонно збільшується із зростанням деформацій, що є наслідком поступового збільшення бочкоутворення бічної поверхні в процесі осадження циліндричного зразка.

Розв'язками диференціальних рівнянь (1) – (3), із урахуванням початкової умови $\varepsilon_z|_{\varepsilon_\varphi=0} = 0$, є вирази

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_\varphi - \frac{3}{2} \cdot m \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon_\varphi}{m}\right), \quad (5)$$

$$\varepsilon_\varphi = -2 \cdot \varepsilon_z + 3 \cdot p \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon_z}{2 \cdot p}\right), \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_\varphi - \frac{3}{2 \cdot m} \cdot \left(e^{-m \cdot \varepsilon_\varphi} - 1\right). \quad (7)$$

Накопичена пластична деформація визначається за відомим співвідношенням [1, 2, 5, 6, 7]

$$\varepsilon_u(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u(\tau) d\tau, \quad (8)$$

де t, τ – час; $\dot{\varepsilon}_u$ – інтенсивність швидкостей деформацій.

Із урахуванням параметричного подання залежностей (5) – (7), вираз для накопиченої деформації (8), після деяких перетворень, набуває вигляду

$$\varepsilon_u(x, m) = m \cdot \int_0^x \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^2 x}} dx, \quad (9)$$

$$\varepsilon_u(x, p) = p \cdot \int_0^x \sqrt{\frac{4}{\cos^2 x} - 3} dx, \quad (10)$$

$$\varepsilon_u(x, m) = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot \left[4 + \ln \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{1+3 \cdot x^2} + 1}{3 \cdot \sqrt{1+3 \cdot x^2} - 1} \right) - 2 \cdot \sqrt{1+3 \cdot x^2} \right]. \quad (11)$$

На рис. 1 приведені траєкторії деформування та розрахункові значення граничних накопичених деформацій згідно лінійному принципу накопичення пошкоджень [6]. Приведені в роботі результати нам важливі для демонстрації та аналізу зв'язку початкових і кінцевих результатів. Як впливає із порівняння приведених даних, траєкторії деформацій відрізняються помітно, причому додатковий аналіз показує, що відбувається це за рахунок значень показника напруженого стану. Проте відмінність розрахункових значень граничних деформацій по цих траєкторіях на порядок менша розкиду експериментальних даних.

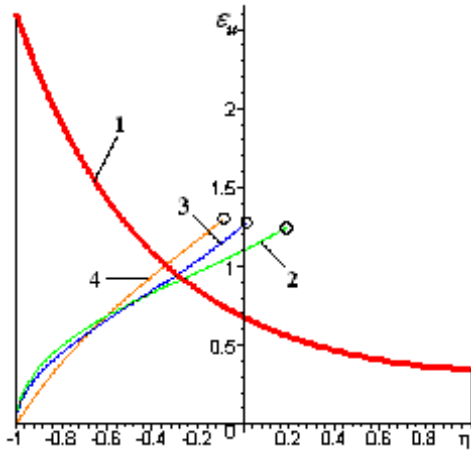


Рис. 1. Траєкторії деформацій та граничні деформації;
 1 – крива граничних деформацій під час стаціонарного деформування;
 2, 3, 4 – траєкторії деформацій розраховані на основі (5) ($m = 0,5$), (6) ($p = 0,857$), (7) ($m = 1,154$) відповідно; \circ – розрахункові значення граничної накопиченої деформації по відповідних траєкторіях

Створення банку апроксимацій типу (9) – (11) та їх аналітичний та чисельний аналіз необхідно для можливості підбору найкращої залежності для конкретних експериментальних даних, а також для побудови ефективних обчислювальних схем розв’язання задачі визначення граничних деформацій за умов нестационарного (складного) деформування. Принципова відмінність залежності (11) від (9), (10) полягає в тому, що це елементарна функція, значення якої обчислюються незрівнянно швидше порівняно з чисельним знаходженням інтегралів типу (9), (10). При розв’язанні задачі визначення граничних деформацій за умов нестационарного деформування обчислення накопиченої деформації відбувається в подвійному ітераційному циклі, в результаті указані функції обчислюються сотні і тисячі разів.

Для випадку гарячого деформування на основі моделі накопичення пошкоджень спадкового типу у роботі [8] для знаходження закону зміни швидкості деформації $\dot{\epsilon}_u = \dot{\epsilon}_u(t)$, при якому за заданий час t_* матеріал набуває найбільшої деформації ϵ_* , сформульована варіаційна задача ізопериметричного типу

$$\begin{aligned} \epsilon_* &= \int_0^{t_*} \dot{\epsilon}_u(\tau) \cdot d\tau \rightarrow \max, \\ \begin{cases} \int_0^{t_*} \varphi(t-\tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\epsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau = 1; \\ \int_0^t \varphi(t-\tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\epsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau \leq 1, \forall t \in (0, t_*). \end{cases} \end{aligned} \tag{12}$$

t, τ – час; $\varphi(t-\tau, I(\tau))$ – ядро спадковості; f – деяка функція.

Розглянемо трьохступеневе деформування

$$\dot{\epsilon}_u = \begin{cases} \dot{\epsilon}_{u1}, & 0 \leq t \leq t_1; \\ \dot{\epsilon}_{u2}, & t_1 \leq t \leq t_2; \\ \dot{\epsilon}_{u3}, & t_2 \leq t \leq t_*. \end{cases} \tag{13}$$

Тоді варіаційна задача (12) зводиться до задачі нелінійного програмування

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{u1} t_*^n - \dot{\epsilon}_{u1} (t_* - t_1)^n + \dot{\epsilon}_{u2} (t_* - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{u2} (t_* - t_2)^n + \dot{\epsilon}_{u3} (t_* - t_2)^n - \gamma^n = 0; \\ -\dot{\epsilon}_{u1} (t_2 - t_1)^n + \dot{\epsilon}_{u1} t_2^n + \dot{\epsilon}_{u2} (t_2 - t_1)^n - \gamma^n < 0; \\ t_1 < \gamma \dot{\epsilon}_{u1}^{-\frac{1}{n}}, \end{cases} \tag{14}$$

де γ, n – параметри, що характеризують властивості матеріалу та умови деформування, а цільова функція ε_* залежить від п'яти змінних $\dot{\varepsilon}_{u1}, \dot{\varepsilon}_{u2}, \dot{\varepsilon}_{u3}, t_1, t_2$.

Оптимальне значення може знаходитись або у стаціонарних точках, що знаходяться в середині області, які визначаються нерівностями

$$F_1(\dot{\varepsilon}_{u1}, \dot{\varepsilon}_{u2}, t_1, t_2) = \dot{\varepsilon}_{u1}t_1 + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_2 - t_1) + \frac{\dot{\varepsilon}_{u1}(t_* - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_1)^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^{n-1}}, \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F_1}{\partial \dot{\varepsilon}_{u1}} = 0; \quad \frac{\partial F_1}{\partial \dot{\varepsilon}_{u2}} = 0; \quad \frac{\partial F_1}{\partial t_1} = 0; \quad \frac{\partial F_1}{\partial t_2} = 0; \\ -\dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n + \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_2 - t_1)^n - \gamma^n < 0; \\ t_1 < \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{-\frac{1}{n}}; \\ \dot{\varepsilon}_{u3} = \frac{\dot{\varepsilon}_{u1}(t_* - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_1)^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^n}, \end{array} \right. \quad (16)$$

або на границі області, тобто при значеннях невідомих, що є розв'язками систем (18), (20), (22)

$$F_2(\varepsilon_{u1}, \varepsilon_{u2}, t_2) = \gamma \varepsilon_{u1}^{-n} + \varepsilon_{u2} \cdot \rho(t_2) + \frac{\dot{\varepsilon}_{u1} \cdot \rho(t_*)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u2} \cdot \rho(t_*)^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^{n-1}},$$

$$\rho(t) = t - \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{-\frac{1}{n}}; \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F_2}{\partial \dot{\varepsilon}_{u1}} = 0; \quad \frac{\partial F_2}{\partial \dot{\varepsilon}_{u2}} = 0; \quad \frac{\partial F_2}{\partial t_2} = 0; \\ -\dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n + \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_2 - t_1)^n - \gamma^n < 0; \\ \dot{\varepsilon}_{u3} = \frac{\dot{\varepsilon}_{u1}(t_* - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u2}(t_* - t_1)^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^n}; \\ t_1 = \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{-\frac{1}{n}}, \end{array} \right. \quad (18)$$

$$F_3(\dot{\varepsilon}_{u1}, t_1, t_2) = \dot{\varepsilon}_{u1}t_1 + \frac{\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n}(t_2 - t_1) + \frac{\dot{\varepsilon}_{u1}(t_* - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^{n-1}} + \frac{(\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n)(t_* - t_2)^n - (\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n)(t_* - t_1)^n}{(t_* - t_2)^{n-1}(t_2 - t_1)^n}, \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F_3}{\partial \dot{\epsilon}_{s1}} = 0; \quad \frac{\partial F_3}{\partial t_1} = 0; \quad \frac{\partial F_3}{\partial t_2} = 0; \\ t_1 < \gamma \dot{\epsilon}_{s1}^{-\frac{1}{n}}; \\ \dot{\epsilon}_{s2} = \frac{\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n}; \\ \dot{\epsilon}_{s3} = \frac{\dot{\epsilon}_{s1}(t_* - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_*^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^n} + \frac{\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n} - \\ - \frac{(\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n)(t_* - t_1)^n}{(t_2 - t_1)^n(t_* - t_2)^n}, \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\begin{aligned} F_4(\dot{\epsilon}_{s1}, t_2) = & \gamma \dot{\epsilon}_{s1}^{1-\frac{1}{n}} + (\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1} \cdot \rho(t_2)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n) \cdot \rho(t_2)^{1-n} + \\ & + \frac{\dot{\epsilon}_{s1} \cdot \rho(t_*)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_*^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^{n-1}} + \frac{(\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1} \cdot \rho(t_2)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n)(t_* - t_2)}{\rho(t_2)^n} - \\ & - \frac{(\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1} \cdot \rho(t_2)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n) \cdot \rho(t_*)^n}{(t_* - t_2)^{n-1} \cdot \rho(t_2)^n}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F_4}{\partial \dot{\epsilon}_{s1}} = 0; \quad \frac{\partial F_4}{\partial t_2} = 0; \\ t_1 = \gamma \dot{\epsilon}_{s1}^{-\frac{1}{n}}; \\ \dot{\epsilon}_{s2} = \frac{\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n}; \\ \dot{\epsilon}_{s3} = \frac{\dot{\epsilon}_{s1}(t_* - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_*^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^n} + \frac{\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n} - \\ - \frac{(\gamma^n + \dot{\epsilon}_{s1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\epsilon}_{s1}t_2^n)(t_* - t_1)^n}{(t_2 - t_1)^n(t_* - t_2)^n}. \end{array} \right. \quad (22)$$

Розв'язок системи (16) визначає клас деформування із сталою швидкістю, що не є оптимальною схемою зміни швидкості, згідно із аналізом, що зроблений у роботі [8]. Тому для конкретного матеріалу, який ідентифікується значеннями γ і n , необхідно знайти розв'язки трьох систем (18), (20), (22) і серед них вибрати той, що відповідає найбільшій деформації. Для визначення оптимальної схеми розроблено MathCad та Maple програми.

Розглянемо експериментальні дані неперервного кручення зразків із сталі 14X17H2 при температурі 1150°C [8]. Згідно розрахунків найбільша деформація, яку здобуває матеріал при трьохступеневій зміні швидкості, визначається системою (22), розв'язавши яку дістанемо

$$\dot{\varepsilon}_n = \begin{cases} 1.59, 0 \leq t \leq 0.821; \\ 0.048, 0.821 < t \leq 9.713; \\ 0.01, 9.713 < t \leq 30. \end{cases} \quad (23)$$

Накопичена деформація, яку отримує матеріал при застосуванні схеми (23), $\varepsilon_n = 1.939$. При деформуванні зі сталюю швидкістю $\varepsilon_n = 1.8$, при застосуванні двохступеневої схеми максимальна деформація $\varepsilon_n = 1.914$ [9]. Тобто при застосуванні схеми (23) отримали збільшення максимальної деформації як у порівнянні із деформуванням зі сталюю швидкістю, так і у порівнянні із оптимальною двохступеневою схемою. Слід зауважити, що ефект від оптимізації зростатиме для матеріалів з яскраво вираженою залежністю граничних деформацій від швидкості деформації.

Висновки

Основний результат – розрахункові значення граничної деформації мало чутливі до розкиду експериментальних даних по визначенню деформацій. Вибір виду апроксимацій залежностей між компонентами деформацій процесу осадження суттєво впливає на побудову шляхів деформування та має невеликий вплив на визначення граничних деформацій. При застосуванні трьохступеневої схеми деформування прослідковується збільшення максимальної деформації як у порівнянні із деформуванням зі сталюю швидкістю, так і у порівнянні із оптимальною двохступеневою схемою.

Список літератури: 1. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов./ Смирнов-Аляев Г. А. –М.–Л.: Машгиз, 1961. – 463 с. 2. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л.Колмогорова. М.: Металлургия. 1977. - 336с. 3. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / Огородников В. А. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с. 4. Матвийчук В.А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография / В.А. Матвийчук, И.С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. - 268 с. ISBN 978-966-379-317-7. 5. Михалевич В. М. Накопичена деформація та інтенсивність логарифмічних деформацій при осадці циліндричних зразків з бочкоутворенням / Михалевич В. М., Добранюк Ю. В.// Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА – 2009 – №1(20) – С.129-134. 6. Михалевич В. М. Побудова ефективних обчислювальних схем у Maple під час розв’язання задачі визначення граничних деформацій за умов складного деформування [Електронний ресурс]/ Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Михалевич О. В. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету.– №2. – Київ: Національна бібліотека ім. В. І. Вернадського. – 2009. – 7 с. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2009_2/2009-2.htm. 7. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / Михалевич В. М. –Вінниця: "УНІВЕРСУМ–Вінниця", 1998 – 195 с. ISBN 966-7199-20-7. 8. Михалевич В. М., Краєвський В. О. Формулювання варіаційної задачі для моделі накопичення пошкоджень при гарячому деформуванні // В зб.: «Обработка материалов тиском» . Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2009. – №2(21). – С. 12-16. – ISBN 978-966-379-339-9. 9. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок // В зб.: «Наукові нотатки». Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк, 2009. – Випуск 25, частина 1. – С. 241-249. – ISBN 5-7763-8653-5.

УДК 669.017