

УДК 621.7.016.2

Матвійчук В. А.
Бубновська І. А.**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ І ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПОЛІВ ЗАГОТОВКИ
В ПРОЦЕСІ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗА СХЕМОЮ «КРУГ – ОВАЛ»**

Сучасні вітчизняні галузі машинобудування та металообробки, які покликані забезпечити підвищення конкурентоспроможності продукції, спрямовують свої зусилля на зменшення енергетичних і матеріальних витрат шляхом розробки та впровадження процесів обробки металів тиском. Особливе місце серед цих процесів займають способи локального деформування, до яких відноситься процес вальцювання.

Вальцювання заготовок поділяється на наступні види: формувальне – для отримання фасонних заготовок під наступне штампування на пресі або молоті; штампувальне – для отримання штампованих заготовок (виробництво заготовок лопаток гарячим вальцюванням); калібрувальне – для точного холодного вальцювання деталей (виробництво холодним вальцюванням заготовок тонко профільних компресорних лопаток) [1].

Найбільшого застосування на підприємствах машинобудівної та авіаційної промисловості набули процеси переформування заготовок вальцюванням. Розвитку і вдосконаленню процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів сприяли роботи Скрябіна С. А. [2, 3]. Разом з тим температурні і деформаційні режими гарячого вальцювання на сьогодні досліджені недостатньо, що заважає подальшому розвитку та вдосконаленню процесів вальцювання.

Метою дослідження є оцінка напружено-деформованого стану і характеру розподілу температур в зоні деформування при гарячому вальцюванні заготовок із алюмінієвого сплаву АК6 за схемою «круг – овал».

У якості розрахункової схеми процесу гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвого сплаву АК6 була обрана схема «круг – овал», як найбільш розповсюджена і для якої характерна наявність жорстких схем напружено-деформованого стану (НДС) заготовки. При цьому розглядався процес вальцювання для заготовок з діаметрами: 25 мм, 35 мм. Розрахункова схема сформована на основі об'ємної кінцево-елементної моделі (рис. 1). Об'ємна твердотіла дискретна модель побудована за допомогою програмного комплексу Autodesk Inventor і експортована в ANSYS. Початкові заготовки розбивалися на відповідну кількість елементів, що дозволяє отримати досить точні результати. Для різних діаметрів заготовок кількість елементів складала: $\varnothing 25$ мм – 13 800; $\varnothing 35$ мм – 13 900.



Рис. 1. Дискретна модель осередку деформації заготовки

При моделюванні задавалися умови реального процесу. Властивості початкової заготовки: модуль Юнга $6,9 \times 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона 0,33, умовна межа течії при температурі 450°C , $\sigma_{0,2} = 62$ МПа. Діаграма істинного напруження при розрахунку описувалася залежністю $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$, де σ_s – істинне напруження, ε_i – інтенсивність деформації, $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації, T – температура. При розрахунку було враховано контактне тертя в умовах гарячого вальцювання ($\mu = 0,32$). Деформуючий інструмент приймався абсолютно жорстким. Враховували тепловіддачу заготовки докільню та інструменту.

За результатами розрахунків був визначений НДС заготовок, зокрема характер розподілу інтенсивності деформації ε_i та інтенсивності напружень σ_i для заготовок $\varnothing 25$ і $\varnothing 35$ в момент початку деформації, на проміжному етапі та на сталій стадії.

На рис. 2 показаний розподіл інтенсивності деформації ε_i в поздовжньому перерізі та умовно відображено місця площини, в яких взяті поперечні перерізи в осередку деформації при вальцюванні.

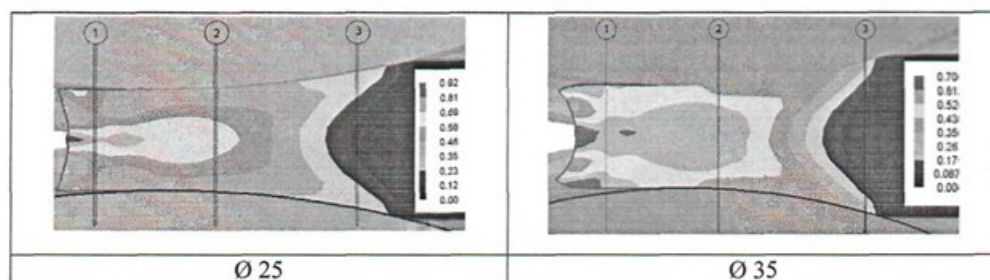


Рис. 2. Характер розподілу інтенсивності деформації ε_i :

1 – переріз сталої стадії; 2 – переріз переходу; 3 – переріз зростання осередку деформації

На рис. 3 представлено характер розподілу інтенсивності напружень σ_i в поздовжньому перерізі осередку деформації.

Отриманий моделюванням характер розподілу температури в поздовжньому перерізі по осі заготовки відповідає характеру розподілу інтенсивності деформації.

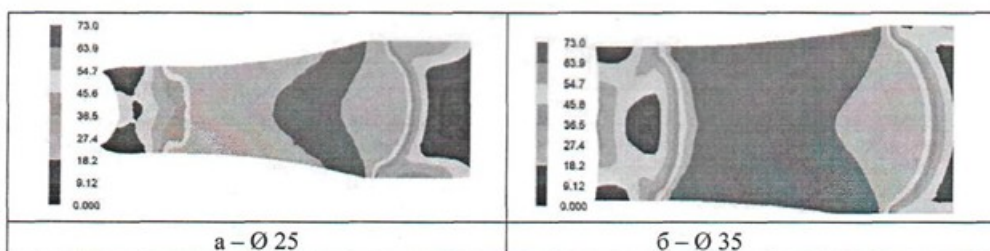


Рис. 3. Характер розподілу інтенсивності напружень σ_i у поздовжньому перерізі осередку деформації

У місці контакту інструменту із заготовкою відбувається значне зниження температури за рахунок тепловіддачі заготовки інструменту. Температура падає і на вільній поверхні, (не контакту) з інструментом. З іншого боку спостерігається значне підвищення температури із зростанням інтенсивності деформації. У місці інтенсивної деформації спостерігається підвищення температури більш ніж на 20°C . Отримані значення температури на поверхні заготовки з достатньою точністю співпадають з результатами, отриманими в роботі [4].

Після аналізу осередку деформації в поздовжньому перерізі, були визначені напруження і деформації в поперечних перерізах на виході заготовки з калібрів, на осі калібрів та на вході заготовки в калібри.

Розподіл інтенсивності деформації ε_i та температури був досліджений в поперечних перерізах в напрямках осей X і Y, як показано на рис. 4.

Розподіл інтенсивності деформації ε_i (рис. 5) та нерівномірності температури (рис. 6) дає нам можливість оцінити характер формування осередку деформації в поперечному перерізі заготовки $\varnothing 25$ мм. Аналогічні результати отримано за результатами моделювання для заготовки $\varnothing 35$ мм.

2 сер. 2015р.

УДК 621.7:519.85

Михалевич В. М.
Добранюк Ю. В.
Матвійчук В. А.
Трач Є. А.

УЗАГАЛЬНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНОЇ МЕТОДИКИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ

Актуальність. Одним із найпоширеніших процесів деформування є вісесиметричне осадження, яке використовується як складова частина технологічного процесу виготовлення деталей, так і як спосіб дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів [1–4]. Як відомо [1–11], під час осадження циліндричних заготовок із малопластичних матеріалів на бічній поверхні утворюються тріщини. При чому ступінь осадження, при якому з'являються тріщини, залежить від інтенсивності бочкоутворення на бічній поверхні. У свою чергу інтенсивність бочкоутворення визначається умовами тертя на торцях заготовки.

Об'єкт дослідження. Напружено-деформований стан бічної поверхні циліндричної заготовки при вісесиметричному осадженні.

Під час проведення аналізу процесів деформування із вільною поверхнею, було визначено, що в основному в літературі відсутня сучасна методика, яка надає можливість ефективного дослідження НДС та деформованості циліндричних заготовок, окрім [5, 8, 9]. У роботі [1–12] розроблена експериментально-аналітична методика визначення напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних заготовок при вісесиметричному осадженні. Окремі частини цієї методики використовувалися і удосконалювалися в багатьох роботах, перш за все в [1, 2, 3]. При цьому розвиваючи і удосконалюючи, насамперед, експериментальну частину методики, а також застосовуючи складніші моделі руйнування, автори прагнули спростити розрахункову частину, що було, в деякій мірі, виправдано рівнем обчислювальних засобів того часу. В результаті, представляючи науковий і практичний інтерес аналітична частина методики визначення напружено-деформованого стану залишилася фактично непоміченою.

Один із кроків на шляху до зменшення значного розриву між сучасними можливостями інформаційних технологій та існуючими методиками визначення НДС під час нестационарних процесів, які мають місце на вільній бічній поверхні циліндричної заготовки при вісесиметричному стисненні було зроблено в роботах [5, 8, 9]. Розвиток аналітичної частини методики дослідження НДС надасть можливість отримати певні узагальненні закономірності.

Метою даної роботи є розроблення узагальненої експериментально-аналітичної методики оцінки напружено-деформованого стану бічної поверхні заготовки при вісесиметричному стисненні.

В основному дослідження напружено-деформованого стану циліндричних заготовок проводиться в циліндричній системі координат. Під час вказаного процесу деформування напрямок головних деформацій співпадає із напрямками осей координатної системи.

В основі представленої в роботах [5–11] експериментально-аналітичної методики дослідження напружено-деформованого стану бічної поверхні заготовок при вісесиметричному осадженні закладені досить жорсткі умови, які рівносильні припущенню про те, що напружений стан в досліджуваній області на початку деформування відповідає напруженому стану стиснення, а із збільшенням деформацій наближається до напруженого стану розтягу. Вказана особливість цієї методики зумовлює закладання похибки під час оцінки напружено-

В даній роботі нами висунуто гіпотезу, що можливі умови деформування, за яких напружений стан на початку деформування може не відповідати стиску, а із збільшенням деформацій напружений стан на бічній поверхні наближається не до напруженого стану розтягу, а до деякого проміжного між стиском та розтягом. У відповідності до сформульованих гіпотез було узагальнено умови [5], яким повинно задовольняти диференціальне рівняння:

$$\Phi\left(\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi}, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z\right) = 0. \quad (2)$$

До таких умов належать наступні:

– на початковому етапі вісесиметричного осадження, при $\varepsilon_\varphi = 0$ маємо певний вид напруженого стану:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -k, \quad -\infty \leq k \leq \infty; \quad (3)$$

– із збільшенням значення колової деформації ε_φ , в зв'язку із розвитком бочкоутворення бічної поверхні, відношення приростів осьової ε_z та колової ε_φ деформацій збільшується (за абсолютною величиною зменшується), тобто:

$$\frac{d\left(\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi}\right)}{d\varepsilon_\varphi} = \frac{d^2\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi^2} \leq 0; \quad (4)$$

– під час необмеженого збільшення деформацій маємо

$$\lim_{\varepsilon_\varphi \rightarrow \infty} \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\xi, \quad \frac{1}{2} \leq \xi \leq 2; \quad (5)$$

– умова мінімальної кількості параметрів;

– умова інтегруємості диференціального рівняння та мінімальної обчислювальної складності розв'язку задачі визначення граничних деформацій;

– диференціальне рівняння повинно бути таке, щоб його розв'язок в параметричній формі можна було представити у вигляді:

$$\begin{cases} \varepsilon_z = p \cdot f_1(t); \\ \varepsilon_\varphi = p \cdot f_2(t); \end{cases} \quad (6)$$

а вирази для визначення показника напруженого стану та накопиченої деформації – у вигляді:

$$\begin{cases} \eta = \eta_1(t); \\ \varepsilon_\eta = p \cdot f_3(t). \end{cases} \quad (7)$$

Враховуючи приведенні вище умови та беручи до уваги наведену гіпотезу, було розроблено диференціальне рівняння залежності між компонентами деформацій бічної поверхні циліндричних заготовок при вісесиметричному осадженні:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{\xi \cdot p^2 \cdot \varepsilon_\varphi^2 + k}{p^2 \cdot \varepsilon_\varphi^2 + k}, \quad p > 0, \quad (8)$$

де p, ξ, k – константи, які визначаються експериментально.

Розв'язавши диференціальне рівняння (8), отримаємо аналітичну залежність між осьювою та коловою деформаціями бічної поверхні циліндричних заготовок при осадженні:

$$\varepsilon_z = -\xi \cdot \varepsilon_\varphi - \frac{1}{p} \cdot (k - \xi) \cdot \operatorname{arctg}(p \cdot \varepsilon_\varphi), \quad (9)$$

яку в параметричному представленні можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \varepsilon_\varphi = \frac{1}{p} \cdot \operatorname{tg}(t); \\ \varepsilon_z = -\frac{1}{p} \cdot (\xi \cdot \operatorname{tg}(t) + (k - \xi) \cdot t); \end{cases} \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \quad (10)$$

Для аналізу залежності відношення приростів деформацій від параметрів p, ξ, k було побудовано, використовуючи співвідношення (8) та (9), відповідні поверхні, що приставлені на рис. 1–3.

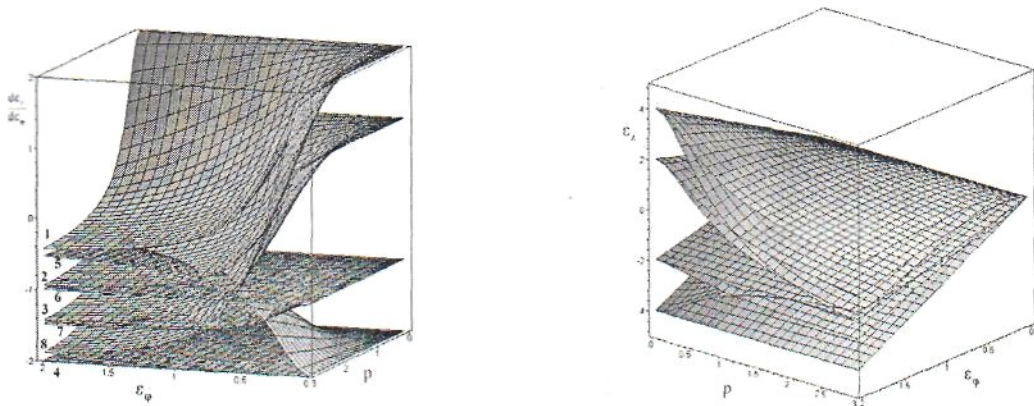


Рис. 1. Поверхні залежності осьової ε_z від колової ε_φ деформацій та похідної від цієї залежності при різних значеннях параметра p, ξ, k :

- 1 – $\xi = 0,5, k = -2$; 2 – $\xi = 1, k = -1$; 3 – $\xi = 1,5, k = 1$; 4 – $\xi = 2, k = 2$; 5 – $\xi = 0,5, k = 2$; 6 – $\xi = 1, k = 1$; 7 – $\xi = 1,5, k = -1$; 8 – $\xi = 2, k = -2$

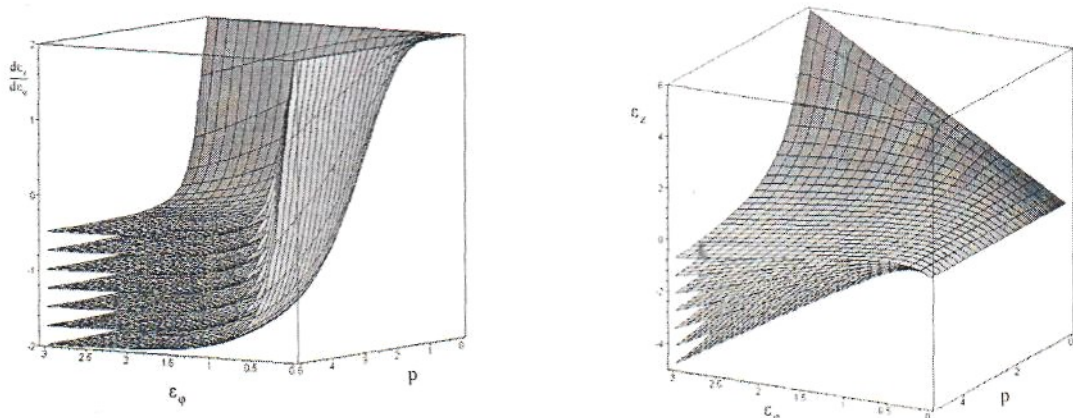


Рис. 2. Поверхні залежності осьової ε_z від колової ε_φ деформацій та похідної від цієї залежності при різних значеннях параметра p, ξ, k (згідно з рис. 1):

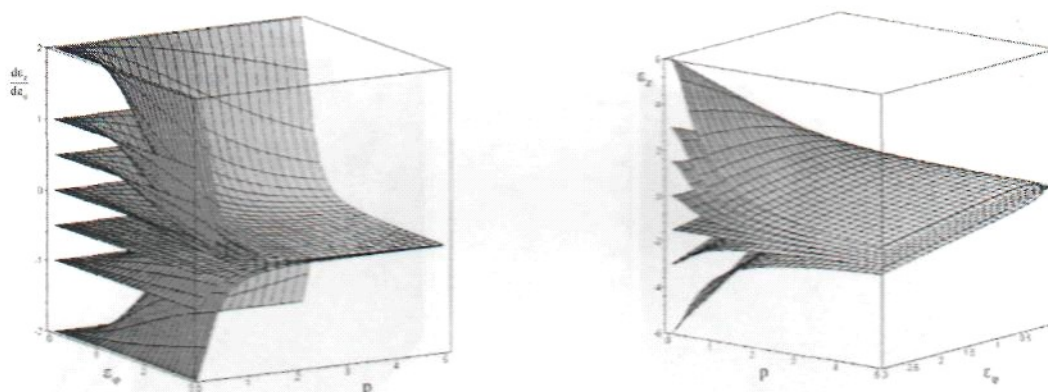


Рис. 3. Поверхні залежності осьової ε_z від колової ε_φ деформацій та похідної від цієї залежності при різних значеннях параметра p, k (зверху донизу): $\xi = 0,5; k = -2; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 2$ відповідно.

Використовуючи вирази для обчислення показника напруженого стану та накопиченої деформації на вільній бічній поверхні при деформуванні [5]:

$$\eta = 6 \cdot \frac{\left(\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} + 1 \right)}{\sqrt{9 + 3 \cdot \left(2 \cdot \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} + 1 \right)^2}}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_u = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \int_0^{\varepsilon_\varphi} \sqrt{\left(\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} \right)^2 + \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} + 1} \cdot d\varepsilon_\varphi, \quad (12)$$

та співвідношення (8), (9), (10), отримано узагальненні співвідношення для оцінки напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричної заготовки при вісесиметричному осадженні:

$$\eta(t, \xi, k) = \frac{\sqrt{3} \cdot (1 - \xi - (k - \xi) \cdot \cos^2(t))}{\sqrt{1 - (1 - \xi) \cdot \xi - [1 - 2 \cdot \xi - (k - \xi) \cdot \cos^2(t)] \cdot (k - \xi) \cdot \cos^2(t)}}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_u(t, p, \xi, k) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot p} \cdot \int_0^t \sqrt{(k - \xi)^2 + \frac{(2 \cdot \xi - 1) \cdot (k - \xi)}{\cos^2(\tau)} + \frac{\xi^2 - \xi + 1}{\cos^2(\tau)}} \cdot d\tau. \quad (14)$$

Використовуючи співвідношення (13) та (14) побудовано поверхні розподілу накопиченої деформації ε_u від показника напруженого стану η , параметра інтенсивності бочкоутворення p при різних значеннях параметрів ξ, k (рис. 4, 5).

Аналіз отриманих залежностей (рис. 4, 5) надав можливість визначити, що при збільшенні параметра бочкоутворення p досить інтенсивно змінюється значення показника напруженого стану η , тобто напружений стан бічної поверхні при деформуванні змінюється, що викликано не монотонністю деформування, тобто, в даному випадку, бочкоутворенням циліндричної заготовки. Також особливо потрібно звернути увагу на те, що при збільшенні значення параметра ξ не монотонність деформування збільшується, тобто швидкість зміни

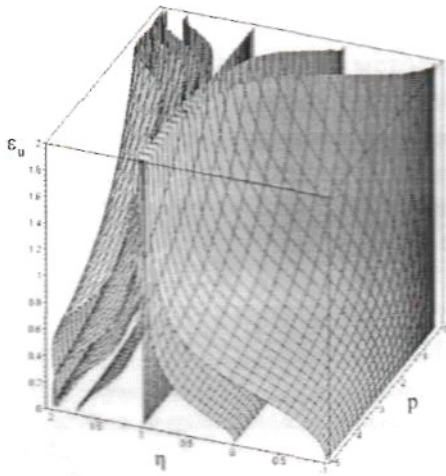


Рис. 4. Поверхні розподілу накопиченої деформації ε_u та показника напруженого стану η при різних значеннях параметрів ξ, k : (зліва направо) $\xi = 0,5; k = -2; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 2$ відповідно

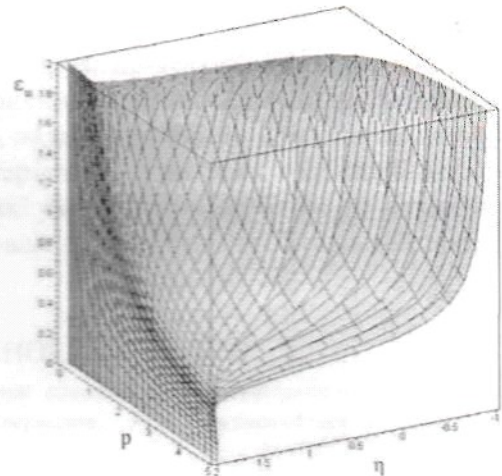


Рис. 5. Поверхні розподілу накопиченої деформації ε_u та показника напруженого стану η при різних значеннях параметрів ξ, k : (зліва направо) $k = -2; \xi = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2$ відповідно

Досить цікавим є вплив параметра k залежностей між компонентами деформацій та його співвідношення із параметром ξ , адже цим визначається початок, напрямок та характер зміни поверхні, чи в частинному випадку траєкторії, деформацій $\varepsilon_u(\eta)$, що ілюстративно представлено на рис. 4.

Кожна із приведених поверхонь включає сім'ю відповідних кривих. Адже при описі визначеного процесу вісесиметричного осадження циліндричної заготовки, ми під час апроксимування залежністю (9) отримуємо значення параметрів ρ, ξ, k , які під час деформування є сталими.

Як уже зазначалося, параметри k, ξ апроксимації між компонентами деформацій при вісесиметричному осадженні, визначають початок та кінець поверхні деформацій. Але точка початку чи кінця вказаної поверхні визначається не самими параметрами, а певним співвідношенням, в які вони входять. Так на початку деформування, накопичена деформація ε_u та параметр, що визначає стадію процесу деформування t дорівнює нулю. Звідси ми отримуємо, використавши вираз (13), співвідношення для визначення точки початку траєкторії деформацій через параметр k :

$$\eta(0, \xi, k) = \frac{\sqrt{3} \cdot (1-k)}{\sqrt{1-k+k^2}}. \quad (15)$$

Для знаходження точки кінця траєкторії чи поверхні деформацій було використано вираз (13), при цьому взято до уваги, що максимального значення деформації та відповідної їй значення показника напруженого стану можемо досягнути при умові, що параметр стадії процесу деформування $t \rightarrow \pi/2$:

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}} (\eta(t, \xi, k)) = \frac{\sqrt{3} \cdot (1-\xi)}{\sqrt{1-\xi+\xi^2}}. \quad (16)$$

Використовуючи отримані співвідношення (15) та (16), можна оцінити особливості

ВИСНОВКИ

Розроблена узагальнена методика оцінки напружено-деформованого стану бічної поверхні при вісесиметричному осадженні циліндричних заготовок, яка включає і апроксимацію залежностей між компонентами деформацій, надає можливість краще описати отримані експериментальні дані, надати попередні характеристики поведінки траєкторії деформацій, виконати наближену оцінку НДС, та виявити деякі узагальненні особливості механіки деформування різних матеріалів, типорозмірів заготовок, фрикційних особливостей процесу деформування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смирнов-Аляев Г. А. *Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов.* / Г. А. Смирнов-Аляев. – М.–Л. : Машиз, 1961. – 463 с.
2. Огородников В. А. *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении* / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
3. Матвійчук В. А. *Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография* / В. А. Матвійчук, И. С. Алиев. – Краматорск : ДГМА, 2009. – 268 с. ISBN 978-966-379-317-7.
4. Михалевиц В. М. *Тензорні моделі накопичення пошкоджень* / В. М. Михалевиц. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 195 с. – ISBN 966-7199-20-7.
5. Михалевиц В. М. *Моделирование напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні* : монографія / В. М. Михалевиц, Ю. В. Добранюк. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 180 с. ISBN 978-966-641-532-8.
6. Михалевиц В. М. *Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 1. Апроксимація деформацій* / В. М. Михалевиц, Ю. В. Добранюк. // Вісник Вінницького політехнічного університету, 2010. – № 2 – С. 97–102.
7. Михалевиц В. М. *Экспериментально-аналитическая методика и математические модели деформированного состояния на свободной боковой поверхности цилиндрических образцов при осесимметричной осадке* / В. М. Михалевиц, Ю. В. Добранюк // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА – 2010 – №1(22) – С. 114 – 119.
8. Михалевиц В. М. *Моделирование пластического деформирования цилиндрического образца при торцевом сжатии* / В. М. Михалевиц, А. А. Лебедев, Ю. В. Добранюк // *Пробл. прочности*, 2011. – № 6. – С. 5–22.
9. Mikhalevich V. M. *Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression* / V. M. Mikhalevich, A. A. Lebedev and Yu. V. Dobranjuk // *Strength of Materials.* – Volume 43, Number 6 (2011), P. 591–603, DOI : 10.1007/s11223-011-9332-7.
10. Михалевиц В. М. *Прогнозування граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні* / В. М. Михалевиц, В. А. Матвійчук, Ю. В. Добранюк, С. А. Трач // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА – 2012 – №1(30) – С. 24–30.
11. Добранюк Ю. В. *Моделирование за допомогою програмного комплексу DEFORM 3D напружено-деформованого стану на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення* / Ю. В. Добранюк, Л. І. Алієва, В. М. Михалевиц // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 3–10.
12. Михалевиц В. М. *Апроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями* / В. М. Михалевиц, Л. И. Алиева // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010 – № 3 (24) – С. 3–10.

REFERENCES

1. Smirnov-Aljaev G. A. *Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformatsioniju. Inzhenernye metody rascheta operacij plasticheskoi obrabotki materialov.* / G. A. Smirnov-Aljaev. – M.–L. : Mashgiz, 1961. – 463 s.
2. Ogorodnikov V. A. *Deformatsionnost' i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii* / V. A. Ogorodnikov. – K. : UMK VO, 1989. – 152 s.
3. Matvijchuk V. A. *Sovershenstvovanie processov lokal'noj rotacionnoj obrabotki davleniem na osnove analiza deformatsionnosti metallov: monografija* / V. A. Matvijchuk, I. S. Aliev. – Kramatorsk : DGMA, 2009. – 268 s.

