

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-деформованого стану циліндричних заготовок із певного класу геометричними та фізико-хімічними параметрами.

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:

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

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 визначається експериментально.

Очевидно, що величини ξ, k, p будуть визначатися умовами тертя на торцях, матеріалом досліджуваної заготовки та її типорозмірами.

Розв'язавши диференціальне рівняння (8), отримаємо аналітичну залежність між осьюовою 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.

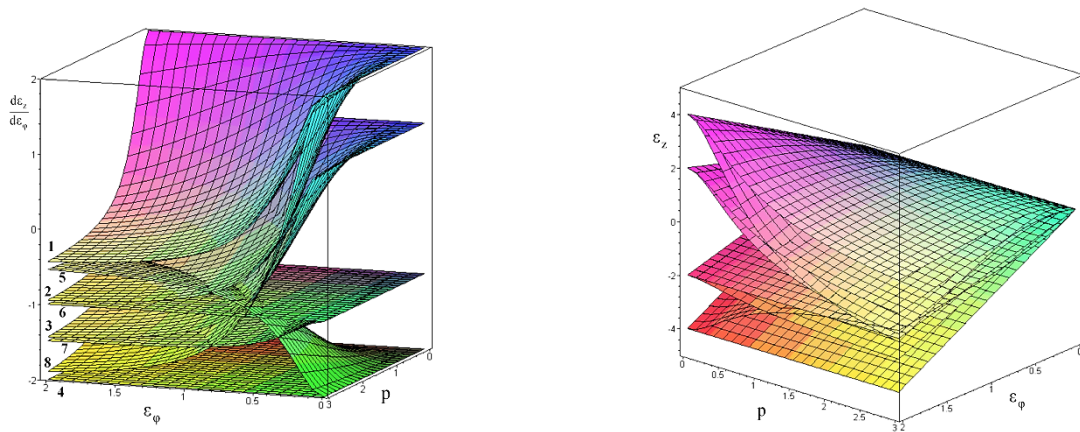


Рис. 1. Поверхні залежності осьюової ε_z від колової ε_φ деформацій та похідної від цієї залежності при різних значеннях параметра p, ξ, k :

- 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 – $\xi = 2, k = -2$

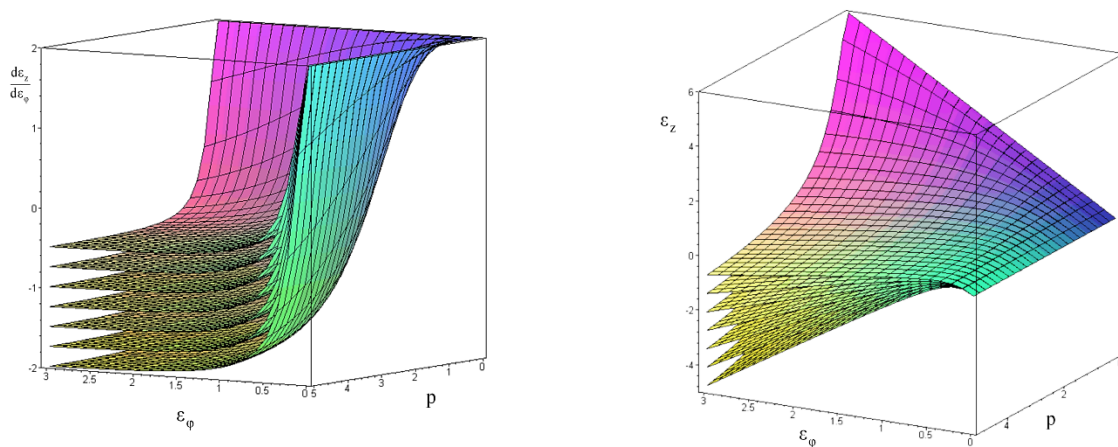


Рис. 2. Поверхні залежності осьюової ε_z від колової ε_φ деформацій та похідної від цієї залежності при різних значеннях параметра p, ξ (зверху донизу): $k = -2; \xi = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2$ відповідно.

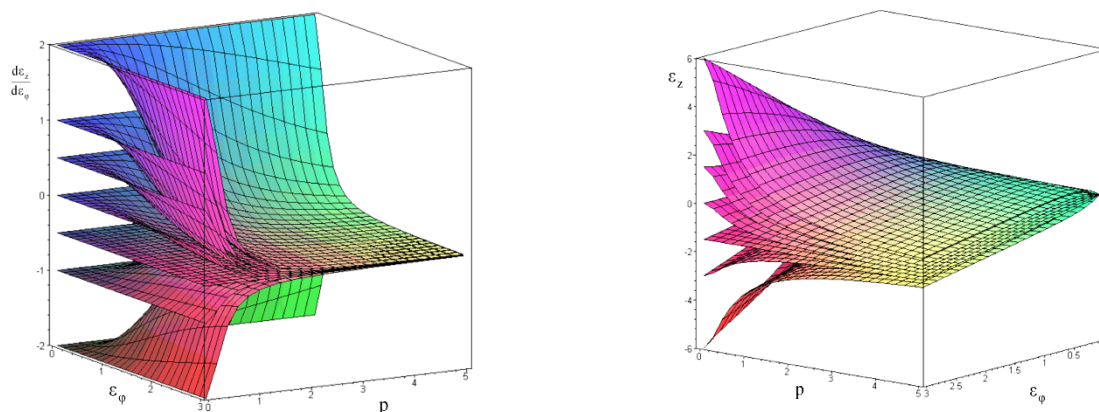


Рис. 3. Поверхні залежності осьової ε_z від колової ε_φ деформацій та похідної від цієї залежності при різних значеннях параметра p, k (зверху донизу): $\xi = 0,5; k = -2; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 2$ відповідно.

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 показника напруженого стану збільшується (рис. 5).

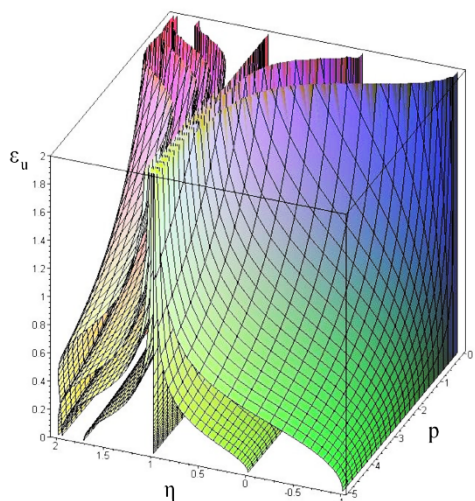


Рис. 4. Поверхні розподілу накопиченої деформації ε_u та показника напруженого стану η при різних значеннях параметрів ξ, k : (зліва направо)

$\xi = 0,5; k = -2; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 2$ відповідно

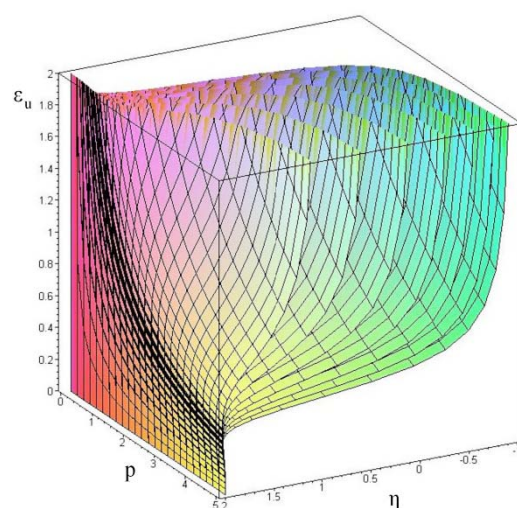


Рис. 5. Поверхні розподілу накопиченої деформації ε_u та показника напруженого стану η при різних значеннях параметрів ξ, k : (зліва направо)

$k = -2; \xi = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2$ 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 p, 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 отримаємо, 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 її 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 розташування та поведінки траєкторії деформацій при певних значеннях параметрів апроксимацій.

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. : Машигиз, 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. Михалевич В. М. *Тензорні моделі накопичення пошкоджень* / В. М. Михалевич. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. – 195 с. – ISBN 966-7199-20-7.
5. Михалевич В. М. *Моделирование напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні* : монографія / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 180 с. ISBN 978-966-641-532-8.
6. Михалевич В. М. *Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 1. Апроксимація деформації* / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк. // Вісник Вінницького політехнічного університету, 2010. – № 2 – С. 97–102.
7. Михалевич В. М. *Экспериментально-аналитическая методика и математические модели деформированного состояния на свободной боковой поверхности цилиндрических образцов при осесимметричной осадке* / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск: ДГМА – 2010 – №1(22) – С. 114 – 119.
8. Михалевич В. М. *Моделирование пластического деформирования цилиндрического образца при торцевом сжатии* / В. М. Михалевич, 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. Dobranyuk // *Strength of Materials.* – Volume 43, Number 6 (2011), P. 591–603, DOI : 10.1007/s11223-011-9332-7.
10. Михалевич В. М. *Прогнозування граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні* / В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук, Ю. В. Добранюк, Є. 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. Михалевич // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 3–10.
12. Михалевич В. М. *Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями* / В. М. Михалевич, 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 deformirovaniju. Inzhenernye metody rascheta operacij plasticheskoy obrabotki materialov.* / G. A. Smirnov-Aljaev. – М.–L. : Mashgiz, 1961. – 463 s.
2. Ogorodnikov V. A. *Deformiruemost' 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 deformiruemosti metallov: monografija* / V. A. Matvijchuk, I. S. Aliev. – Kramatorsk : DGMA, 2009. – 268 s. ISBN 978-966-379-317-7.
4. Mihalevich V. M. *Tenzorni modeli nakopichennja poshkodzhen' / V. M. Mihalevich.* – Vinnicja : UNIVERSUM–Vinnicja, 1998. – 195 s. – ISBN 966-7199-20-7.

5. Mihalevich V. M. *Modeljuvannja napruzhenno-deformovanogo ta granichnogo staniv poverhni cilindrichnih zrazkiv pri torcevom stisnenni : monografija / V. M. Mihalevich, Ju. V. Dobranjuk. – Vinnicja : VNTU, 2013. – 180 s. ISBN 978-966-641-532-8.*
6. Mihalevich V. M. *Model' plastichnogo deformuvannja materialu na vil'nij poverhni cilindrichnih zrazkiv pid chas visesimetrchnogo osadzhenija. Chastina 1. Aproksimacija deformacij / V. M. Mihalevich, Ju. V. Dobranjuk. // Visnik Vinnic'kogo politehnichnogo universitetu, 2010. – № 2 – S. 97–102.*
7. Mihalevich V. M. *Jeksperimental'no-analiticheska metodika i matematicheskie modeli deformirovanogo sostojanija na svobodnoj bokovoj poverhnosti cilindricheskikh obrazcov pri osesimmetrichnoj osad-ke / V. M. Mihalevich, Ju. V. Dobranjuk // Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Krama-torsk: DGMA – 2010 – №1(22) – S. 114 – 119.*
8. Mihalevich V. M. *Modelirovanie plasticheskogo deformirovanija cilindricheskogo obrazca pri torcevom szhatii / V. M. Mihalevich, A. A. Lebedev, Ju. V. Dobranjuk // Probl. prochnosti, 2011.– № 6.– S. 5–22.*
9. Mihalevich V. M. *Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression / V. M. Mihalevich, 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. Mihalevich V. M. *Prognozuvannja granichnogo stanu bichnoï poverhni cilindrichnih zrazkiv pri torcevom stisnenni / V. M. Mihalevich, V. A. Matvijchuk, Ju. V. Dobranjuk, Є. A. Trach // Obrabotka metallov davle-niem: sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA – 2012 – №1(30) – S. 24–30.*
11. Dobranjuk Ju. V. *Modeljuvannja za dopomogoj programnogo kompleksu DEFORM 3D napruzhenno-deformovanogo stanu na bichnij poverhni cilindrichnogo zrazka pid chas torceвого stisnennja / Ju. V. Dobranjuk, L. I. Alieva, V. M. Mihalevich // Obrabotka metallov davlenim : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 4 (25). – S. 3–10.*
12. Mihalevich V. M. *Approksimacija krivyh predel'noj deformacii splajn-funkcijami / V. M. Mihalevich, L. I. Alieva // Obrabotka metallov davlenim : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2010 – № 3 (24) – S. 3–10.*

Михалевич В. М.	– д-р техн. наук, проф. ВНТУ
Добранюк Ю. В.	– канд. техн. наук, ст. викл. ВНТУ
Матвійчук В. А.	– д-р техн. наук, проф. ВНАУ
Трач Є. А.	– аспірант ВНТУ

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ВНАУ – Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця.

E- mail: vmykhal@gmail.com; dobranuk@mail.ru