

УДК 621.7:519.85

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

## ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ ТОРЦЕВОМУ СТИСНЕННІ

Торцеве стиснення циліндричних зразків є не лише поширеною технологічною операцією із наявністю вільної поверхні, але і одним із основних видів лабораторних досліджень для визначення найважливіших технологічних властивостей матеріалів.

Напружено-деформований та граничний стани бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення.

Теорія процесу стиснення є базовою для створення та удосконалення певних теоретичних методик розрахунку технологічних параметрів різноманітних процесів кування, об'ємного штампування, прокатки. Тому дані про особливості та закономірності згаданого процесу представляють теоретичний та практичний інтерес. В процесі торцевого стиснення, у зв'язку із нерівномірністю деформацій відбувається викривлення форми вільної поверхні, тобто має місце процес бочкоутворення, від якого залежить напружено-деформований стан та граничні деформації матеріалу. Дослідження закономірностей зміни напружено-деформованого стану та деформованості зразків під час цього процесу залишається актуальним і на сьогодні. В роботах [1–10] представлено ряд результатів, які отримані на основі експериментально-аналітичного підходу.

Протягом останніх років значного поширення набуло моделювання процесів деформування методами скінченних та граничних елементів за допомогою спеціалізованих пакетів [11–12]. Але відомі результати стосуються перш за все формозміни заготовок під час деформування, розподілення інтенсивності напружень та деформацій за умов неповного аналізу отриманих результатів і недостатньо прозорого висвітлення умов чисельного моделювання.

Метою даної роботи є відтворення аналітичної залежності між коловою та осьювою деформаціями та подальше визначення граничних деформацій на основі початкового фрагменту указаної залежності, отриманої чисельним моделюванням.

Для дослідження процесу стиснення циліндричних зразків між плоскими шорсткими плитами було проведено моделювання в програмному комплексі Deform-3D. Досліджуваний зразок моделювався із забезпеченням  $h/d = 1,8$ . Матеріал – сталь марки X10Cr12. Властивості матеріалу моделювали в програмному комплексі, використовуючи дані з довідника В. А. Крохи [13]. В якості фізичних співвідношень між напруженнями та деформаціями використовували співвідношення теорії течії, зміцнення матеріалу – ізотропне, структура – нормалізована. Параметри тертя вибиралися наступними: тип – shear, коефіцієнт – 0,5. Швидкість переміщення головного інструменту (пуансона) складає 1 мм/с. Стиснення проводилось до етапу досягнення висоти зразка 10 мм. Час деформування – 18 с. Розрахунок процесу в програмному комплексі поділений на 100 кроків.

В результаті моделювання отримали картини формозміни зразка під час деформування (рис. 1), розподілення по об'єму зразка інтенсивності деформацій (рис. 2), інтенсивності напружень (рис. 3).

В роботі [14] розроблено комбіновану методику експериментально-аналітичного та чисельного моделювання. Вихідними даними для указаної методики є залежності між осьювою  $\varepsilon_z$  та коловою  $\varepsilon_\varphi$  деформаціями, які отримано чисельним моделюванням процесу стиснення.

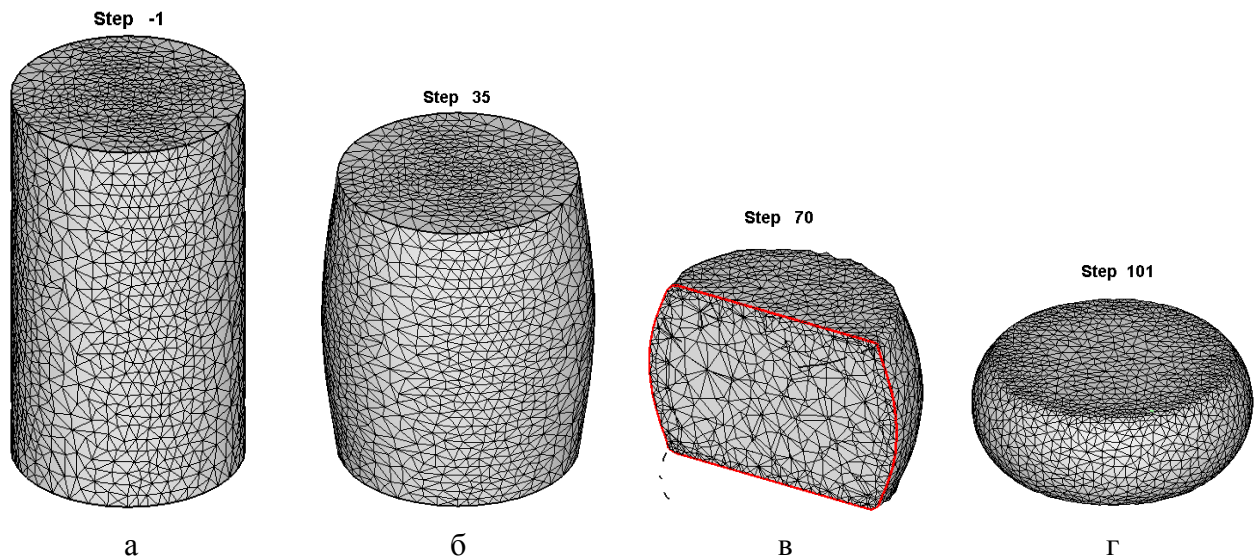


Рис. 1. Формозміна циліндричного зразка при торцевому стисненні:  
а – початковий етап; б – на 35 кроці стиснення; в – на 70 кроці стиснення; г – кінцевий крок деформування

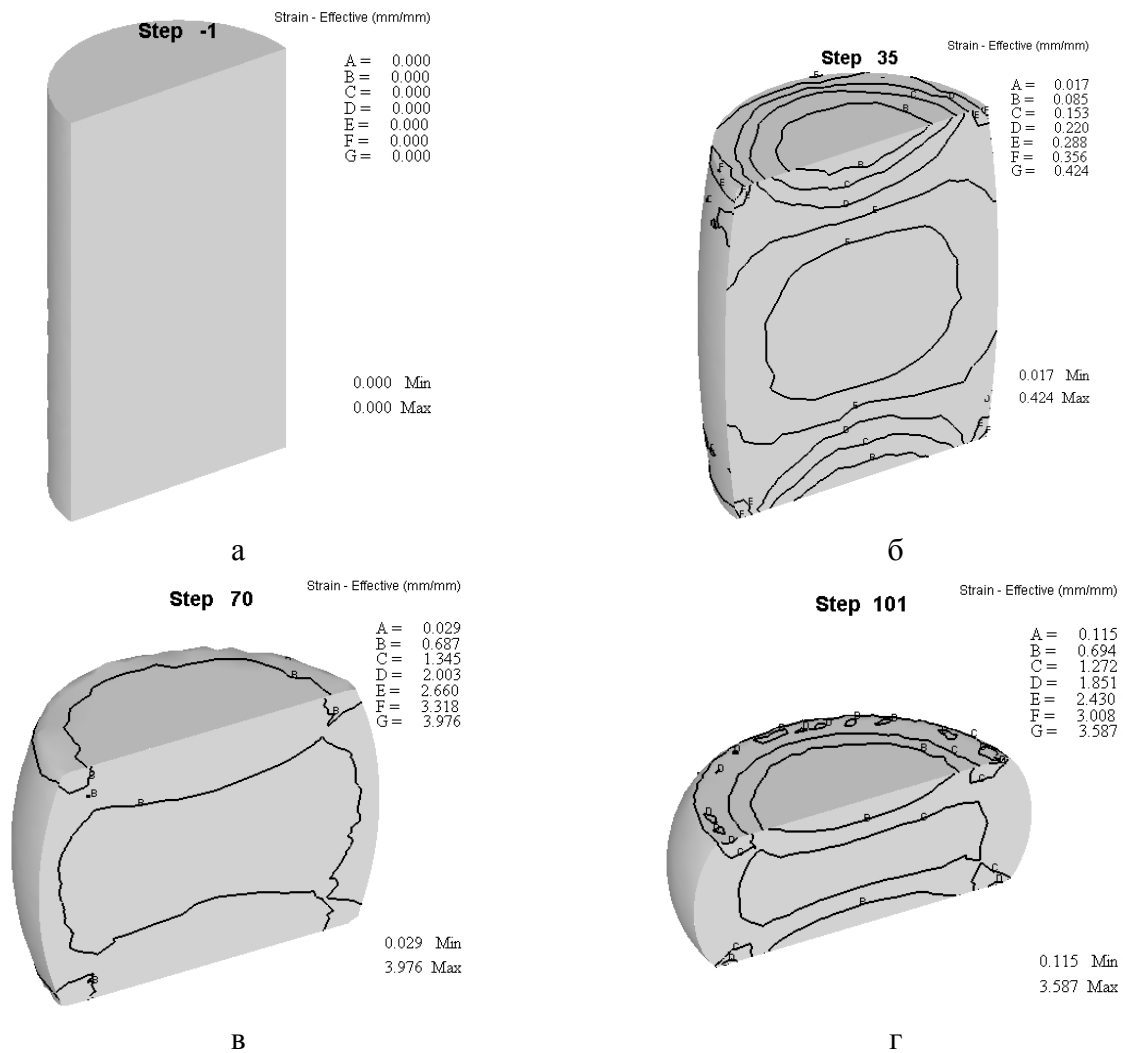


Рис. 2. Розподілення накопиченої деформації в об'ємі та меридіальному перерізі циліндричного зразка під час стиснення:  
а – початковий етап; б – на 35 кроці стиснення; в – на 70 кроці стиснення; г – кінцевий крок деформування

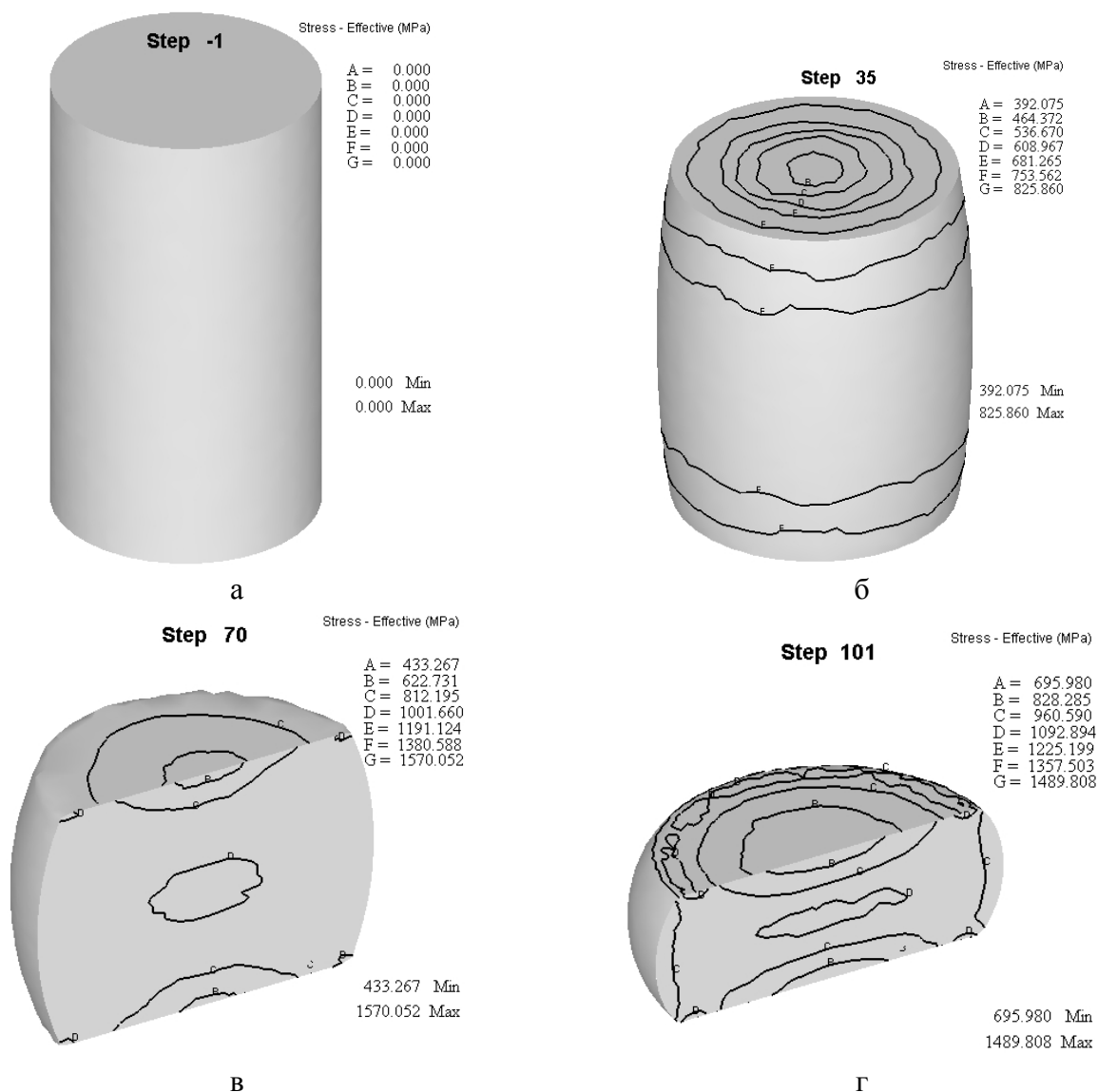


Рис. 3. Розподілення інтенсивності напружень по об'єму та меридіальному перерізу циліндричного зразка під час стиснення:

а – початковий етап; б – на 35 кроці стиснення; в – на 70 кроці стиснення; г – кінцевий крок деформування

Для врахування особливостей механіки формозміни залежність  $\varepsilon_\varphi = f(\varepsilon_z)$  конструювали у вигляді розв'язку диференціального рівняння з відокремленими змінними [4, 5, 7, 8, 9, 10]:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2}e^{-\varepsilon_\varphi/m}, m > 0, \quad (1)$$

де  $m > 0$  – константа, яка визначається експериментально. Розв'язком диференціального рівняння (1), із урахуванням початкової умови:

$$\varepsilon_z|_{\varepsilon_\varphi=0} = 0, \quad (2)$$

отримаємо [4, 5, 7, 8, 9, 10]:

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

Використовуючи параметричний вигляд залежності (3) [7, 8, 9, 10]:

$$\begin{cases} \varepsilon_\varphi = -m \cdot \ln(1-t); \\ \varepsilon_z = \frac{m}{2} \cdot [\ln(1-t) - 3 \cdot t], \end{cases} t \in [0,1), \quad (4)$$

де  $t$  – параметр, який характеризує стадію процесу деформування, вирази для обчислення показника напруженого стану  $\eta$  та накопиченої деформації  $\varepsilon_u$ , модель розсіяних пошкоджень, яка враховує лінійний принцип накопичення [5–10]:

$$\psi(\varepsilon_u) = \int_0^{\varepsilon_u} \frac{d\varepsilon_u}{\varepsilon_{*c}[\eta(\varepsilon_u)]}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{*c} = \varepsilon_{*c}(\eta)$  – діаграма пластичності під час стаціонарного деформування,  $\eta = \eta(\varepsilon_u)$  – траєкторії деформацій, та апроксимацію діаграми пластичності [15]:

$$\varepsilon_{*c}(\eta) = a_2 \cdot \exp\left(-\eta \cdot \ln\left(\frac{(1-\eta) \cdot a_1}{2 \cdot a_2} + \frac{(1+\eta) \cdot a_2}{2 \cdot a_3}\right)\right), \quad \eta \in [-1, 1], \quad (6)$$

де  $a_1 > a_2 > a_3 > 0$  – деякі константи, які визначаються відповідно до результатів досліджень в умовах стаціонарного деформування, отримаємо модель граничного стану бічної поверхні циліндричних зразків під час торцевого стиснення:

$$\begin{cases} \varepsilon_u(t, m) = m \int_0^t \sqrt{\frac{1}{(1-x)^2} + 3} \cdot dx = \frac{m}{2} \left[ 4 + \right. \\ \left. + \ln\left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\sqrt{1+3(1-t)^2} + 1}{\sqrt{1+3(1-t)^2} - 1}\right) - 2\sqrt{1+3(1-t)^2} \right], t \in [0,1); \\ \eta(t) = \frac{3t-2}{\sqrt{1+3(1-t)^2}}, t \in [0,1); \\ \int_0^{t_*(m)} \frac{m \sqrt{\frac{1}{(1-t)^2} + 3}}{a_2 \cdot \exp\left(-\frac{(3t-2) \ln\left(\frac{(1-w(t))a_1}{2a_2} + \frac{(1+w(t))a_2}{2a_3}\right)}{\sqrt{4-6t+3t^2}}\right)} dt - 1 = 0, \\ w(t) = \frac{3t-2}{\sqrt{4-6t+3t^2}}. \end{cases} \quad (7)$$

Із використанням моделі (7), розроблено методику прогнозування граничних деформацій матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків на основі початкового фрагменту даних, отриманих чисельним моделюванням.

При цьому «початкову ділянку» відновлюваної кривої залежностей між компонентами деформацій можна характеризувати тільки кількістю точок  $N_n$ , оскільки величина накопиченої деформації на межі ділянки може бути визначена наближено як добуток  $N_n$ , та  $\Delta_c$ , де  $\Delta_c$  – середина характерного інтервалу для відповідної групи матеріалу. Так, для сталей  $\Delta_c = 0,105$ .

Дослідження точності відтворення траєкторії деформації та визначення розрахункового значення граничних деформацій від кількості використаних точок виконували на основі даних торцевого стиснення циліндричного зразка із сталі X10Cr12, отриманих чисельним моделюванням.

Апроксимування експериментальних даних, визначення граничних деформацій, побудову траєкторій деформацій та кривих граничних деформацій виконували із використанням комп'ютерних програм «Апроксимація залежностей між компонентами деформацій на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення» [4] та «Розрахунок граничного стану та побудова кривих граничних деформацій бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення» [5].

В результаті чисельного дослідження стиснення зразка отримали 21 значення компонент деформацій бічної поверхні, які було використано для дослідження впливу кількості даних на точність визначення граничних деформацій. Відповідно до зазначених умов, точне розрахункове значення граничних деформацій отримано із використанням даних на всіх етапах чисельного моделювання, тобто за 21 точкою. Відносно отриманого значення граничних деформацій будемо оцінювати точність визначення граничного стану на основі неповної сукупності експериментальних даних.

Результати апроксимування залежностей між компонентами деформацій матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків під час торцевого стиснення представлені на рис. 4.

Здійснення аналізу впливу кількості використаних початкових етапів моделювання на точність прогнозування можна проводити як порівнянням кривих залежності між компонентами деформацій, так і траєкторій деформацій. Візуально розбіжність різних кривих набагато краще спостерігається для траєкторій деформацій, оскільки вони визначаються похідними залежності між компонентами деформацій.

Побудова траєкторій деформацій та визначення граничних деформацій в залежності від кількості початкових етапів, отриманих чисельним моделюванням, представлено на рис. 5 та в табл. 2.

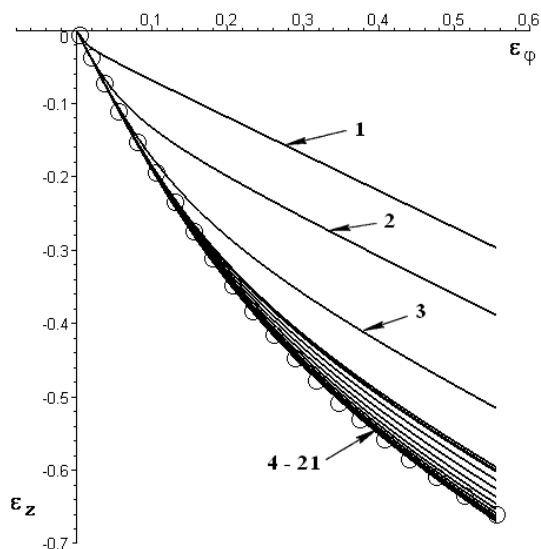


Рис. 4. Залежність між осьовою  $\varepsilon_z$  та коловою  $\varepsilon_\phi$  деформаціями бічної поверхні циліндричних зразків під час торцевого стиснення, яка апроксимована співвідношенням (3) із використанням від 1 до 21 точок (криві 1–21 відповідно)

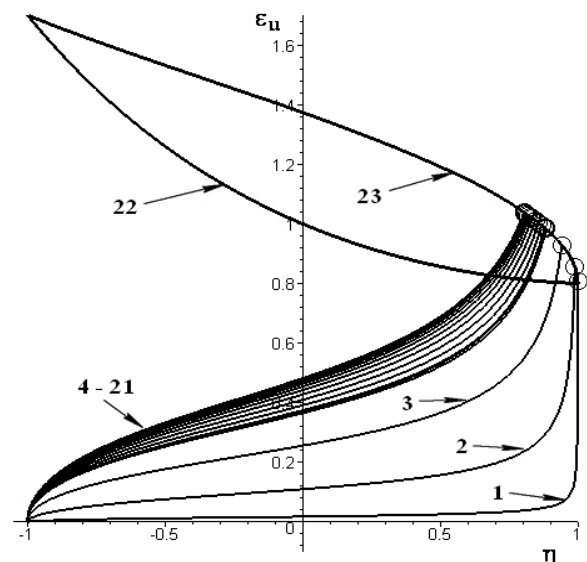


Рис. 5. Криві граничних деформацій та траєкторії деформацій бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення:

1–21 – траєкторії деформацій; 22 – крива граничних деформацій під час стаціонарного деформування ( $a_1=1,7; a_2=1,0; a_3=0,8$ ); 23 – крива граничних деформацій під час нестаціонарного деформування

Аналіз результатів, які представлені в табл. 1 та рис. 4–5, показав, що починаючи із вибору трьох-чотирьох початкових етапів, що отримані чисельним моделюванням, в результаті відтворення кривої залежностей між осью та коловою деформаціями та визначення граничних деформацій, отримується похибка, яка знаходиться в межах розбіжності між результатами експериментально-аналітичного та чисельного дослідження НДС матеріалу бічної поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні.

Таблиця 1

Значення граничних деформацій при прогнозуванні граничного стану бічної поверхні зразка зі сталі X10Cr12 під час торцевого стиснення

Точки, N / %	$t_*$	$\eta_*$	$\varepsilon_*$	$\Delta_{\varepsilon_*} =  \varepsilon_{*i} - \varepsilon_{*k} ,$ $i = 1..k$	$\Delta_{\varepsilon}, \%$
1 / 4,76	1,5605	1,0	0,8097	0,2262	21,84
2 / 9,52	1,5092	0,9886	0,8562	0,1797	17,35
3 / 14,28	1,4311	0,9413	0,9292	0,1067	10,30
4 / 19	1,3718	0,8807	0,9871	0,0488	4,71
5 / 23,8	1,3749	0,8844	0,984	0,0519	5,01
6 / 28,6	1,3702	0,8788	0,99	0,0459	4,43
7 / 33,4	1,3618	0,8684	0,9948	0,0411	3,97
8 / 38,1	1,3526	0,8567	1,0037	0,0322	3,11
9 / 42,9	1,3441	0,8452	1,012	0,0239	2,31
10 / 47,6	1,3368	0,8352	1,0191	0,0168	1,62
11 / 52,4	1,3311	0,827	1,0247	0,0112	1,08
12 / 57,1	1,3262	0,8199	1,029	0,0069	0,67
13 / 61,9	1,3228	0,8148	1,0324	0,0035	0,34
14 / 66,7	1,3201	0,8108	1,035	0,0009	0,09
15 / 71,4	1,3180	0,8076	1,037	0,0011	0,11
16 / 76,2	1,3176	0,8071	1,0374	0,0015	0,14
17 / 81	1,3173	0,8066	1,0379	0,002	0,19
18 / 85,7	1,3171	0,8062	1,0379	0,002	0,19
19 / 90,5	1,3175	0,8068	1,0375	0,0016	0,15
20 / 95,2	1,3181	0,8078	1,0369	0,001	0,10
21 / 100	1,3191	0,8093	1,0359	0	0,00

## ВИСНОВКИ

Аналіз отриманих результатів показує, що для прогнозування граничних деформацій матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків під час торцевого стиснення та відтворення траєкторії деформацій відповідно до комбінованої методики експериментально-аналітичного та чисельного моделювання в деяких випадках достатньо використовувати 3–4 початкових етапів моделювання. Результати розв'язання задачі нададуть можливість не лише прогнозувати момент досягнення граничного стану на початкових стадіях деформування та при необхідності вносити певні зміни у процес, але й реалізовувати експрес-методику дослідження властивостей матеріалу за рахунок зменшення тривалості чисельного моделювання 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.
4. Михалевич В. М. Апроксимація залежностей між компонентами деформацій на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38309 від 11 травня 2011 р.
5. Добранюк Ю. В. Розрахунок граничного стану та побудова кривих граничних деформацій бічної поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення / Ю. В. Добранюк, В. М. Михалевич, О. В. Михалевич // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38308 від 11 травня 2011 р.
6. Михалевич В. М. Вісесиметрична осадака циліндричних заготовок / В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, Ю. В. Добранюк // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк, 2009. – Випуск 25, ч. 1. – С. 241–249.
7. Михалевич В. М. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Ч. 1. Апроксимація деформацій / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2010. – № 2 – С. 97–102.
8. 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.
9. Михалевич В. М. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Ч. 2. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2010. – № 3 – С. 99–102.
10. Михалевич В. М. Моделирование пластического деформирования цилиндрического образца при торцевом сжатии / В. М. Михалевич, А. А. Лебедев, Ю. В. Добранюк // Пробл. прочн. – 2011. – № 6. – С. 5–22.
11. Алиева Л. И. Моделирование разрушения в процессе радиального выдавливания фланца [Электронный ресурс] / Л. И. Алиева, П. Абхари, Я. Г. Жбанков // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2008. – № 3Е (14). – С. 2–7. – Режим доступа к журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/index.htm>.
12. Маковецький А. В. Использование конечно-элементного моделирования в ряде задач обработки металлов давлением / А. В. Маковецький, А. В. Маковецький // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 61–66.
13. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации : справочник / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1980. – 157 с.
14. Добранюк Ю. В. Моделивання 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.
15. Михалевич В. М. Апроксимація кривих предельной деформации сплайн-функциями / В. М. Михалевич, Л. И. Алиева // Обработка металлов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 3–10.

Михалевич В. М. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ВНТУ;

Матвійчук В. А. – д-р техн. наук, проф., заст. дир. з наук. роботи ННІ АЕ ВНАУ;

Добранюк Ю. В. – асистент ВНТУ;

Трач Є. А. – аспірант ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ННІ АЕ ВНАУ – Навчально-науковий інститут аграрної економіки Вінницького національного аграрного університету, м. Вінниця.

E-mail: [vmykhal@gmail.com](mailto:vmykhal@gmail.com); [dobranuk@mail.ru](mailto:dobranuk@mail.ru)

Стаття надійшла до редакції 06.02.2012 р.