

РАЗДЕЛ I МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.7:519.85

Добранюк Ю. В.
Алієва Л. І.
Михалевич В. М.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ DEFORM-3D НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НА БІЧНІЙ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЗРАЗКА ПІД ЧАС ТОРЦЕВОГО СТИСНЕННЯ

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

Деформівність та напружено-деформований стан на вільній бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення.

Теорія процесу стиснення являється 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 напружено-деформованого стану та деформівності зразків під час цього процесу залишається актуальним і на сьогодні. В роботах [1–9] представлено ряд результатів, які отримані на основі експериментально-аналітичного підходу.

Протягом останніх років значного поширення набуло моделювання процесів деформування методами скінчених та граничних елементів за допомогою спеціалізованих пакетів [10–13]. 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 імітаційного моделювання.

Метою даної роботи є дослідження з використанням імітаційного моделювання в програмному комплексі Deform-3D формозміни, напружено-деформованого стану та деформівності зразків під час торцевого стиснення, а також розробка методики комбінування методів імітаційного та експериментально-аналітичного моделювання.

Для дослідження процесу стиснення циліндричних зразків між плоскими шорсткими плитами було проведено моделювання в програмному комплексі Deform-3D. Досліджуваний зразок моделювався із забезпеченням $h/d = 1,75$. Матеріал – сталь марки 34CrAlMo5, яка вибиралася із наявних в програмному комплексі бібліотек матеріалів. 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 заготовки під час деформування (рис. 1), розподілення по об'єму зразка інтенсивності деформацій (рис. 2), інтенсивності напружень (рис. 3) та накопичених пошкоджень (рис. 4).

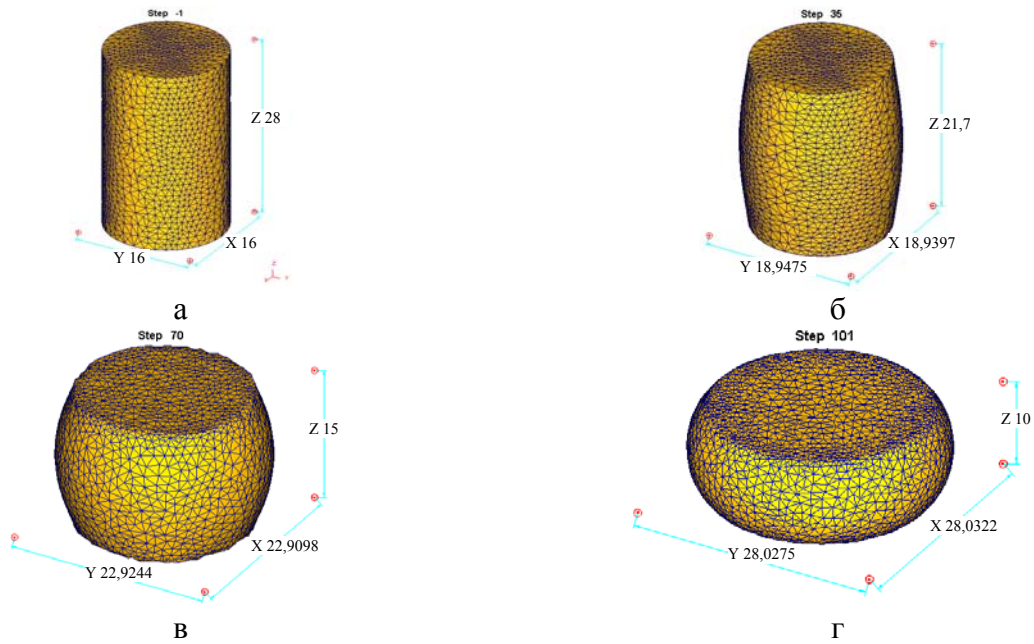


Рис. 1. Формозміна циліндричного зразка під час стиснення:
а – початковий етап; б – на 35 кроці стиснення; в – на 70 кроці стиснення; г – кінцевий крок деформування

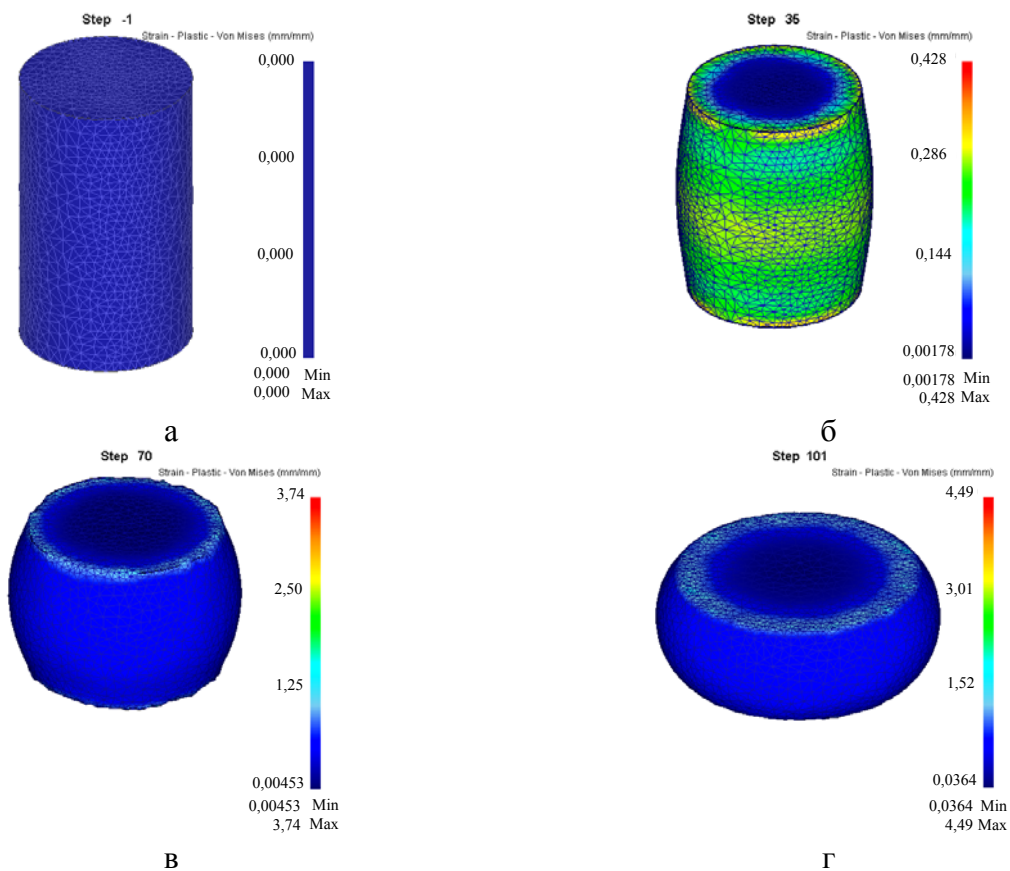


Рис. 2. Розподілення інтенсивності деформацій в об'ємі циліндричного зразка під час стиснення:
а – початковий етап; б – на 35 кроці стиснення; в – на 70 кроці стиснення; г – кінцевий крок деформування

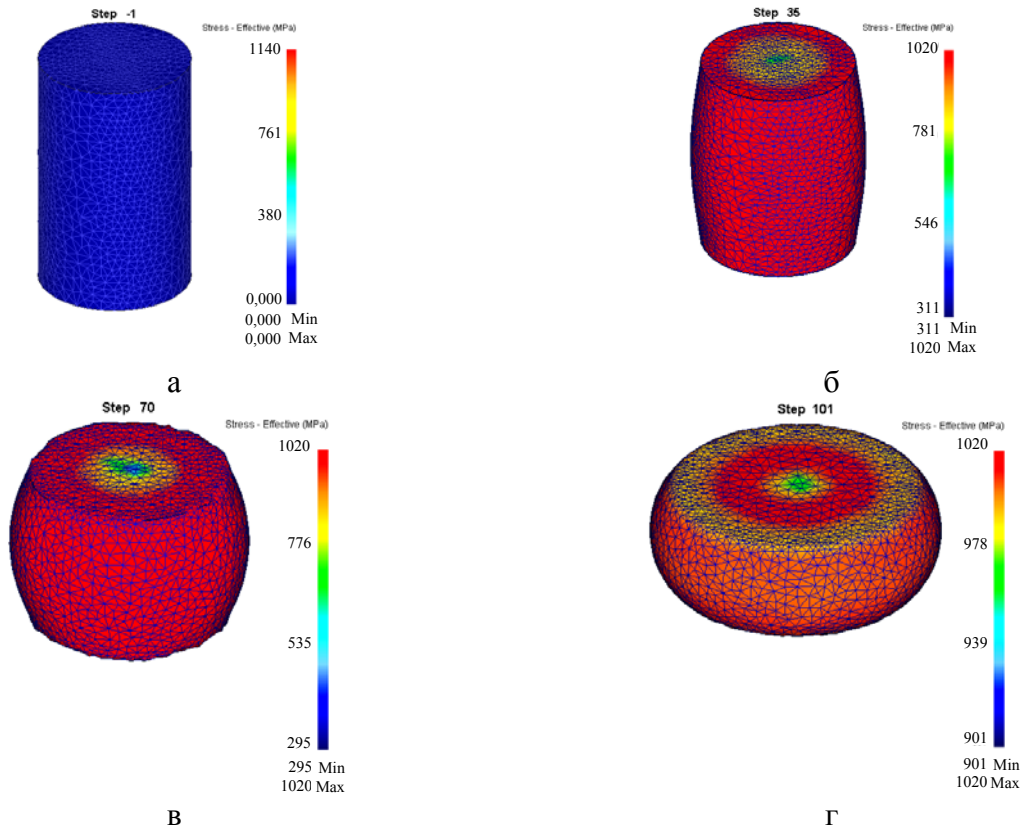


Рис. 3. Розподілення інтенсивності напружень по об'єму циліндричного зразка під час стиснення:

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

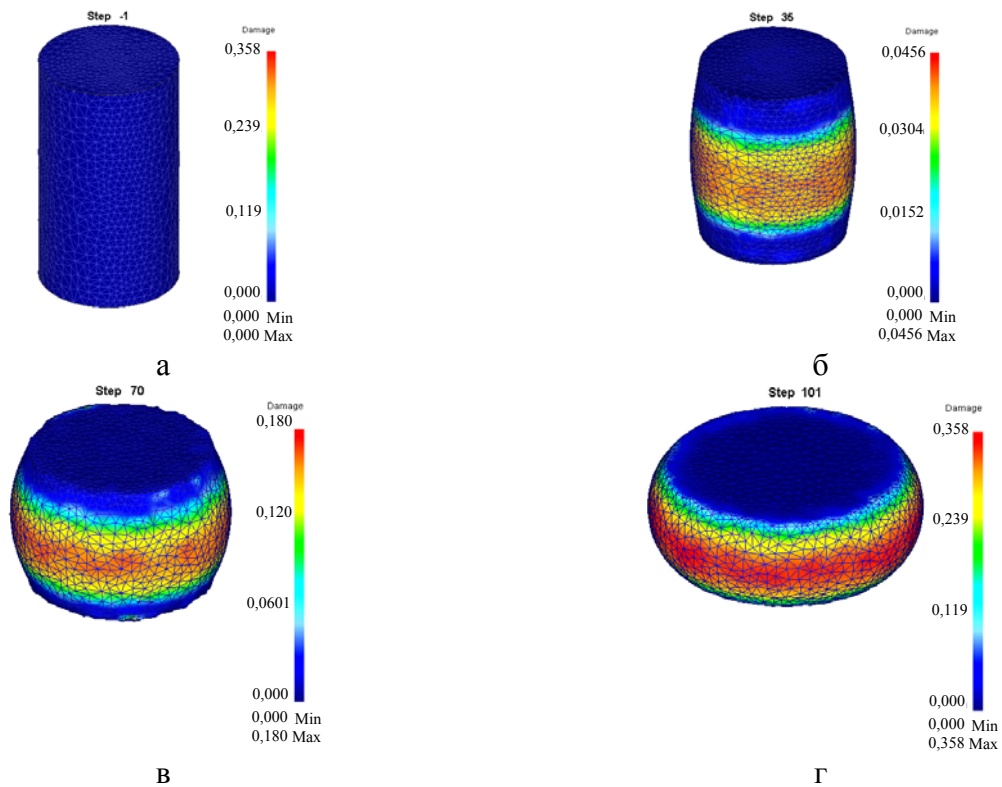


Рис. 4. Розподілення накопичення пошкоджень в об'ємі циліндричного зразка під час стиснення:

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

Пошкодження в програмному комплексі Deform-3D обчислюються відповідно до моделі Cockroft-Latham [13]:

$$\int_0^{\varepsilon_u} \frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\sigma_u} \cdot d\varepsilon_u = C, \quad (1)$$

де $\bar{\sigma}_{\max}$ – максимальне головне розтягуюче напруження; C – константа матеріалу.

Для здобуття результатів моделювання в меридіальному перерізі зразка, скористалися спеціальними командами в постпроцесорі Deform-3D. Отримані результати представлено на рис. 5.

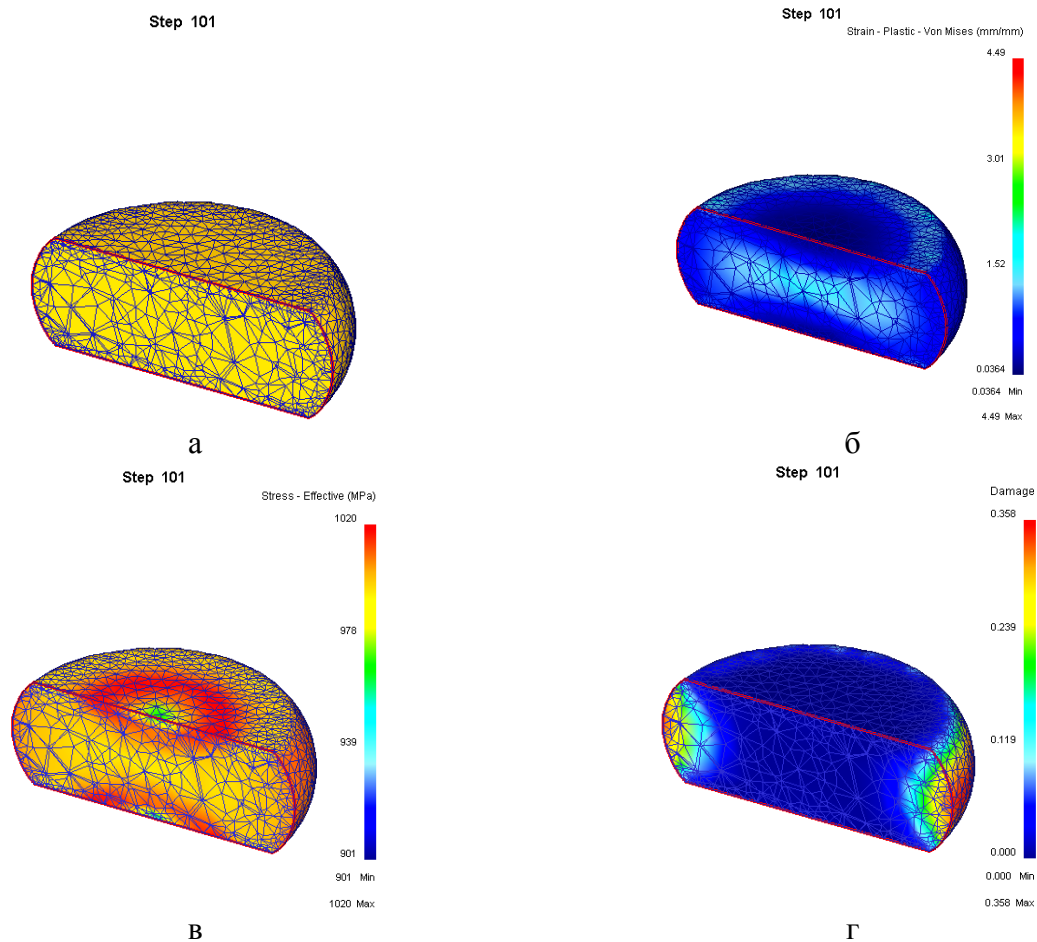


Рис. 5. Формозміна (а) та розподілення в меридіальному перерізі циліндричного зразка на кінцевому етапі стиснення інтенсивності деформацій (б); інтенсивності напружень (в); накопичених пошкоджень (г)

Для визначення потенційно найбільш небезпечної області побудовано траєкторії деформацій в координатах $\varepsilon_u - \eta$ для декількох точок бічної поверхні циліндричного зразка, а також для внутрішньої точки, що є центром симетрії. ε_u – накопичена деформація, η – показник напруженого стану [1, 2, 4 – 10, 14]:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (2)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні компоненти тензора напружень; σ_u – інтенсивність напружень.

Схема розташування указаних точок проілюстрована на рис. 6, а їх координати приведено в табл. 1.



Рис. 6. Розташування досліджуваних точок циліндричного зразка

Таблиця 1

Значення координат досліджуваних точок циліндричного зразка

№ точки	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	8	0	14
2	8	0	18
3	8	0	10
4	0	0	14

Траєкторії деформацій, які представлені на рис. 7, будували в пакеті прикладних програм Maple на основі табличних значень компонент напружень та накопиченої деформації, отриманих в пакеті Deform-3D.

Аналіз представлених результатів свідчить про те, що серед точок 1–3 потенційно найнебезпечнішою є точка 1, яка розташована в середній по висоті області бічної поверхні. Це пов'язано з тим, що траєкторія деформацій для точки 1 розташована в області більш жорсткого напруженого стану.

Особливої уваги потребує аналіз порівняння траєкторій 1 та 4. Із отриманих результатів випливає, що траєкторія 1 знаходиться в області більш несприятливого напруженого стану, а траєкторії 4 відповідає значно більша накопичена деформація.

Отже, ініціювання процесу руйнування можливе в обох точках і залежить від кривої граничних деформацій досліджуваного матеріалу.

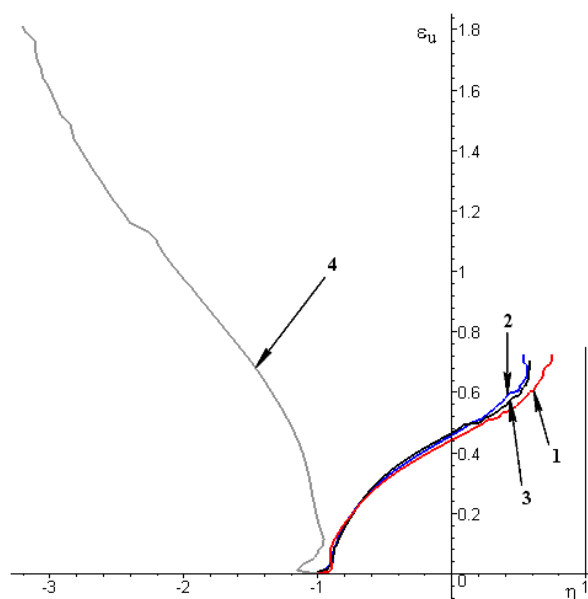


Рис. 7. Траєкторії деформацій для різних точок циліндричного зразка, що побудовано за результатами імітаційного моделювання в програмному комплексі Deform-3D

В даній роботі розроблено альтернативну методику побудови траєкторій деформацій для точок вільної бічної поверхні. Методика базується на комбінуванні результатів моделювання за допомогою комплексу Deform-3D та експериментально-аналітичного підходу [1, 4–9]. Вихідними даними є залежності між осьюовою ε_z та коловою ε_φ деформаціями, які отримано імітаційним моделюванням процесу стиснення. Для врахування особливостей механіки формозміни залежність $\varepsilon_\varphi = f(\varepsilon_z)$ конструювали у вигляді диференціального рівняння:

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

де $p > 0$ – константа, розв’язком якого отримано структуру шуканої залежності:

$$\varepsilon_\varphi = -2 \cdot \varepsilon_z + 3 \cdot p \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon_z}{2 \cdot p}\right). \quad (4)$$

Для здобуття, на основі залежності (4), аналітичного опису траєкторії деформацій, доцільно перейти до її параметричного представлення:

$$\begin{cases} \varepsilon_z = -2 \cdot p \cdot \operatorname{tg}(t) \\ \varepsilon_\varphi = p \cdot (4 \cdot \operatorname{tg}(t) - 3 \cdot t) \end{cases} \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]. \quad (5)$$

Значення параметра p визначається методом найменших квадратів. Оскільки даний метод приводить до необхідності розв’язання трансцендентного рівняння складної структури, то значення параметра p визначали реалізацією безпосередньої мінімізації за допомогою стандартної команди додаткового пакету Optimization системи Maple та перепроверили отримані значення із допомогою надбудови Microsoft Excel Solver. Отримані результати представлено на рис. 8.

Згідно (5), співвідношення для накопиченої деформації набуває вигляду [9]:

$$\varepsilon_u(t, p) = p \cdot \int_0^t \sqrt{\left(\frac{4}{\cos^2(x)} - 3\right)^2} + 3 \cdot dx, \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]. \quad (6)$$

Використання теорії течії та умови відсутності радіального напруження на бічній поверхні, дозволило отримати співвідношення для показника напруженого стану (2):

$$\eta(t) = \frac{3 \cdot \sin^2(t) - 1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \sin^4(t)}}, \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]. \quad (7)$$

Результати, що представлені на рис. 9, з одного боку свідчать про достовірність даних з моделювання напруженого стану в Deform-3D, а з іншого боку – про переваги комбінованої методики: на кривій 2, на відміну від траєкторії 1, відсутні незрозумілі коливання, породжені, швидше за все, обчислювальною похибкою.

ВИСНОВКИ

Аналіз результатів моделювання процесу стиснення свідчить, що найбільш небезпечними, з точки зору руйнування, є середня по висоті бічна поверхня циліндричного зразка,

в якій напружений стан найбільш «жорсткий», та область в центрі симетрії – з найбільшою накопиченою деформацією. Комбінування імітаційного моделювання процесу деформування точок бічної поверхні із експериментально-аналітичним підходом дозволило: упевнитися в достовірності результатів обчислення накопиченої деформації та моделювання напруженого стану; мінімізувати похибку скінчено-елементного підходу під час визначення напруженого стану; отримати аналітичне описання траєкторії деформацій з урахуванням особливостей механіки формозміни, що, в свою чергу, розширює можливості моделювання руйнування матеріалу згідно теорії деформування.

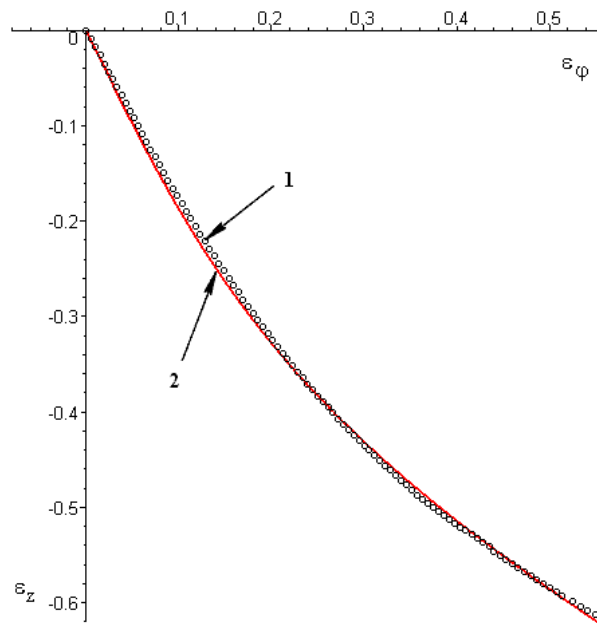


Рис. 8. Значення деформацій, які отримано під час імітаційного моделювання процесу торцевого стиснення в програмному комплексі Deform-3D, та їх апроксимація залежністю (5): параметр $p = 0,18345$, сума квадратів відхилень дорівнює $0,0001949$

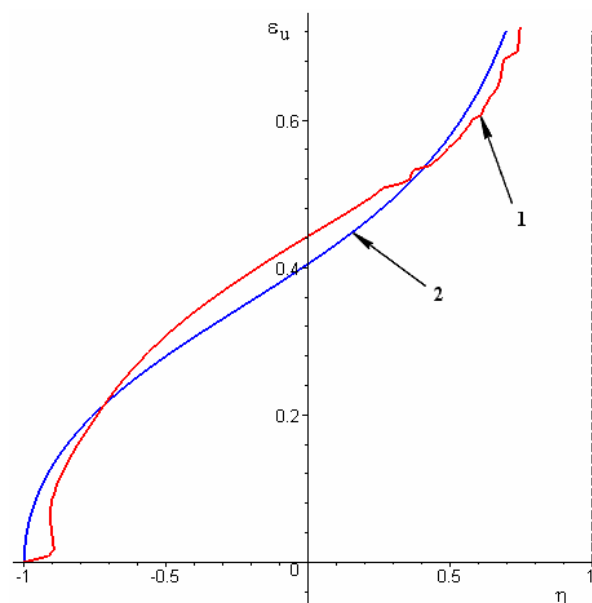


Рис. 9. Траєкторії деформації потенційно небезпечної точки на вільній поверхні циліндричного зразка:

1 – розрахунки відповідно до формули (2) за результатами значень компонент напружень та накопиченої деформації, отриманих у Deform-3D; 2 – розрахунки за (6), (7) відповідно до комбінованої методики

ЛІТЕРАТУРА

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. Огородников В. А. Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації : монографія / В. А. Огородников, В. І. Музичук, О. В. Нахайчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 179 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.
5. Михалевич В. М. Побудова ефективних обчислювальних схем у Maple під час розв'язання задачі визначення граничних деформацій за умов складного деформування [Електронний ресурс] / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, О. В. Михалевич // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – Київ: Національна бібліотека ім. В. І. Вернадського. – 2009. – № 2. – 7 с. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2009_2/2009-2.htm.
6. Михалевич В. М. Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок / В. М. Михалевич, В. О. Красевський, 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. Частина 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. Частина 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. 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. – Київ : Національна бібліотека ім. В. І. Вернадського. – 2008. – № 3Е (14). – С. 2–7. – Режим доступу до журн. : <http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/index.htm>.
11. 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.
12. Шестаков Н. А. Моделирование потери устойчивости пластической деформации / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, А. В. Власов // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА – 2009. – № 1(20). – С. 9–12.
13. Песин А. М. Моделирование формоизменения поверхностных трещин непрерывнолитого сляба при черновой прокатке на широкополосном стане [Электронный ресурс] / А. М. Песин, В. М. Салганик, Д. О. Пустовойтов. – 3 с. – Режим доступу : http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_maggtu2.pdf.
14. Лебедев А. А. О выборе инвариантов напряженного состояния при решении задач механики материалов / А. А. Лебедев, В. М. Михалевич // Проблемы прочности. – 2003. – № 3. – С. 5–14.

Добранюк Ю. В. – аспірант ВНТУ;

Алієва Л. І. – канд. техн. наук, ст. викл. кафедри ОМТ ДДМА;

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

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

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