

УДК 621.77

Гулько І. В.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК**

Вальцювання заготовок відноситься до високоефективних технологічних процесів і поділяється на три основних види: формувальне – для отримання фасонних заготовок під наступне штампування на пресах або молотах; штампувальне – для отримання штампованих заготовок (виробництво заготовок лопаток гарячим вальцюванням); калібрувальне – для точного холодного вальцювання деталей замість обробки різанням (виробництво холодним вальцюванням заготовок тонкопрофільних компресорних лопаток) [1, 3].

При розробці процесів вальцювання важливими задачами є оцінка формозміни, напружено-деформованого стану (НДС) та деформівності матеріалу заготовок. Особливо актуальною така оцінка є для процесів холодного формування вальцюванням при необхідності досягнення значних ступенів деформації. Розв'язок указаних задач надає можливість оцінювати рівень накопичених в матеріалі заготовки пошкоджень з використанням критеріїв деформівності [2, 3, 4]. Вирішення задачі аналізу формозміни та оцінки НДС матеріалу заготовки надає можливість назначати раціональні параметри процесу холодного вальцювання або обґрунтовано переходити до більш енергомістких процесів гарячого вальцювання матеріалів при їх недостатній пластичності.

Задача визначення НДС матеріалу заготовки при вальцюванні може бути розв'язана за допомогою сучасних суперпотужних спеціалізованих пакетів скінченно-елементного моделювання типу ANSYS/LS-DYNA та Deform 3D. В роботі [5] запропоновано методику використання експериментально-аналітичного методу визначення НДС до налаштування моделювання пластичного деформування за допомогою програмного комплексу Deform 3D. Удосконалений експериментально-аналітичний метод визначення НДС [2, 3, 7, 8, 9] може бути покладений в основу аналізу НДС матеріалу заготовки на вільній поверхні в процесах вальцювання. Такі результати мають самостійне значення, а не лише для налаштування моделювання пластичного деформування за допомогою програмного комплексу Deform 3D або йому подібних. Це пов'язане з тим, що вільна поверхня заготовки в процесах вальцювання, як правило, є найбільш небезпечною з точки зору концентрації накопичених розсіяних пошкоджень.

*НДС та деформівність матеріалу вільної бічної поверхні циліндричної заготовки при вальцюванні.*

Метою даної роботи є дослідження з використанням імітаційного моделювання в програмному комплексі Deform 3D формозміни, НДС та деформівності заготовок при вальцюванні, а також апробація методики комбінування методів імітаційного та експериментально-аналітичного моделювання.

Для дослідження процесу вальцювання вихідних циліндричних заготовок між гладкими циліндричними валками [10] було проведено моделювання в програмному комплексі Deform 3D. Досліджувана заготовка моделювалася із забезпеченням геометричних розмірів:  $d_1 = 10$  мм,  $l = 40$  мм. Матеріал – пластичний, алюмінієвий сплав Al – 5056, Gold [70F (20 °C)] (аналог сплаву АМг5 в країнах СНГ ГОСТ 4784-97), який вибирався із наявних в програмному комплексі бібліотек матеріалів.

Робочий інструмент: два гладких циліндричних валка  $d = 60$  мм. В якості фізичних співвідношень між напруженнями та деформаціями використовували співвідношення теорії течії, зміцнення матеріалу – ізотропне, структура – нормалізована. Швидкість переміщення (обертання) головного інструменту (валків) складає 0,1047 рад./с. Параметри вальцювання: відстань між валками  $d_3 = 4$  мм. Схематично процес вальцювання показано на рис. 1.

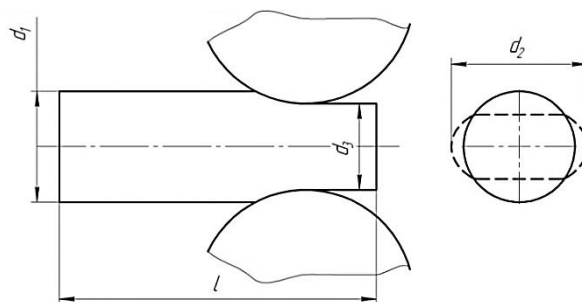


Рис. 1. Схематичне зображення процесу вальцювання

Деформування проводилося по всій довжині зразка. Час деформування – 34 с. Розрахунок процесу в програмному комплексі поділений на 80 кроків. В зв'язку із тим, що процес деформування в даному випадку є симетричним, то моделювання проводилося для 1/4 частини зразка із врахуванням граничних умов в площинах симетрії. На рис. 2 та 3 представлено зображення заготовки та інструменту при вальцюванні з побудованою сіткою.



Рис. 2. Заготовка для вальцювання:

а – вигляд заготовки із сіткою; б – побудова сітки в 1/4 частині заготовки

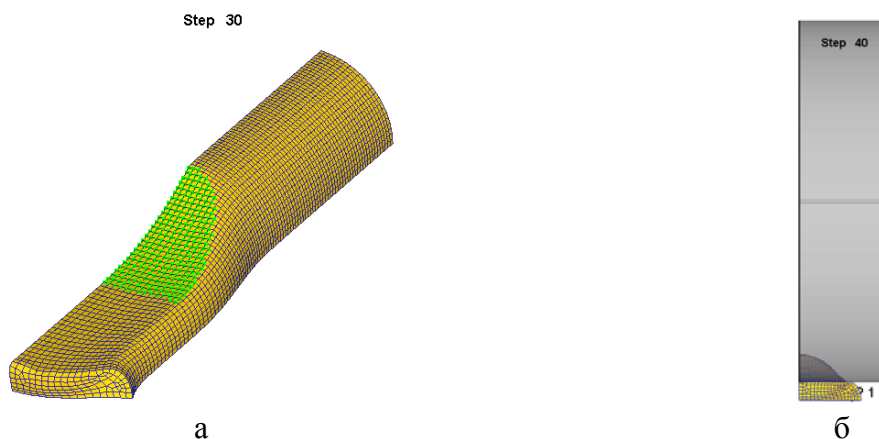


Рис. 3. Заготовка та інструмент під час вальцювання (а) та (б)

В результаті проведеного імітаційного моделювання отримано картини розподілення по об'єму заготовки інтенсивності напружень, накопиченої деформації та накопичених пошкоджень (рис. 4).

Пошкодження в програмному комплексі Deform 3D обчислюються відповідно до моделі Cockroft-Latham [6]:

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

де  $\bar{\sigma}_{\max}$  – максимальне головне розтягуюче напруження;

$C$  – константа матеріалу.

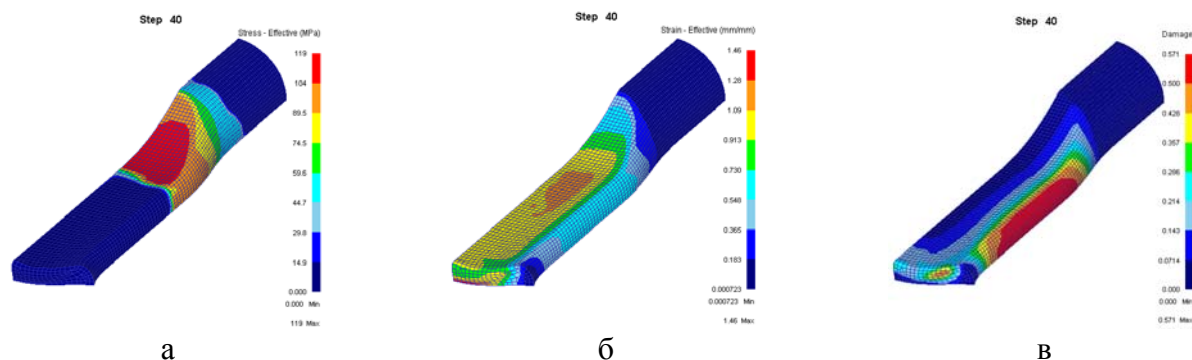


Рис. 4. Розподілення інтенсивності напружень (а), накопиченої деформації (б) і накопичених пошкоджень (в) в 1/4 циліндричної заготовки на проміжному етапі вальцювання (40 крок)

Із представлених на рис. 4 картин розподілення накопичених пошкоджень відповідно до моделі Cockroft-Latham (1) очевидно, що однією із найнебезпечніших зон заготовки стосовно накопичення пошкоджень є середня по висоті вільна бічна поверхня. Тому особливої уваги потребує дослідження НДС заготовки на вільній бічній поверхні. Для аналізу НДС під час деформування в небезпечній зоні циліндричної заготовки, вибираємо точку на її вільній поверхні (рис. 5). Початок координат на рис. 5 розташований на вісі заготовки в точці початку деформування. Вісь заготовки – напрямок  $OX$ . Суть проведеного аналізу полягала в побудові траєкторії деформацій в координатах  $\varepsilon_u - \eta$  для указанної точки бічної поверхні заготовки:  $\varepsilon_u$  – накопичена деформація,  $\eta$  – показник напруженого стану [2–5, 7–9, 11]:

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

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

$\sigma_u$  – інтенсивність напружень.

Траєкторію деформацій, яку представлено на рис. 6, будували на основі табличних значень компонент напружень та накопиченої деформації, отриманих в пакеті Deform 3D.

Для ґрунтовного аналізу НДС та деформівності в потенційно небезпечній точці P1 заготовки при вальцюванні, побудовано графіки зміни накопичених пошкоджень в цій точці відповідно до моделі Cockroft-Latham (1), накопиченої деформації, формозміни в напрямку екваторіального бочкоутворення (рис. 7).



Рис. 5. Розташування досліджуваної точки P1 циліндричної заготовки із координатами:  $x = 20$ ;  $y = 5$ ;  $z = 0$

На основі започаткованого в роботі [5] та частково розвинутого в роботах [7, 8, 9, 11] підходу була розроблена методика побудови траєкторій деформацій для точок вільної бічної поверхні. Методика базується на комбінуванні результатів моделювання за допомогою програмного комплексу Deform 3D та експериментально-аналітичного підходу [5, 8, 9]. Вихідними даними є залежності між осьовою  $\varepsilon_z$  та коловою  $\varepsilon_y$  деформаціями [11], які отримано імітаційним моделюванням процесу стиснення.

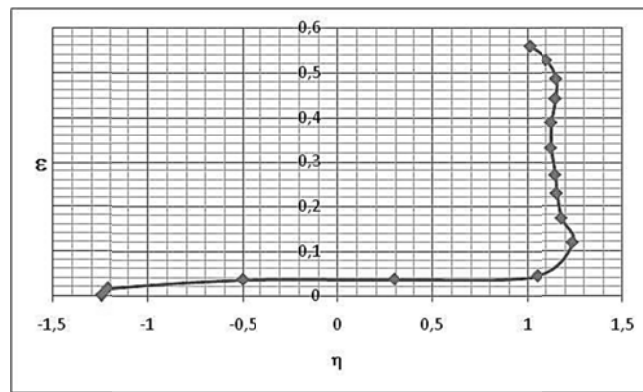


Рис. 6. Траекторія деформацій точки P1 циліндричної заготовки, що побудовано за результатами імітаційного моделювання в програмному комплексі Deform 3D

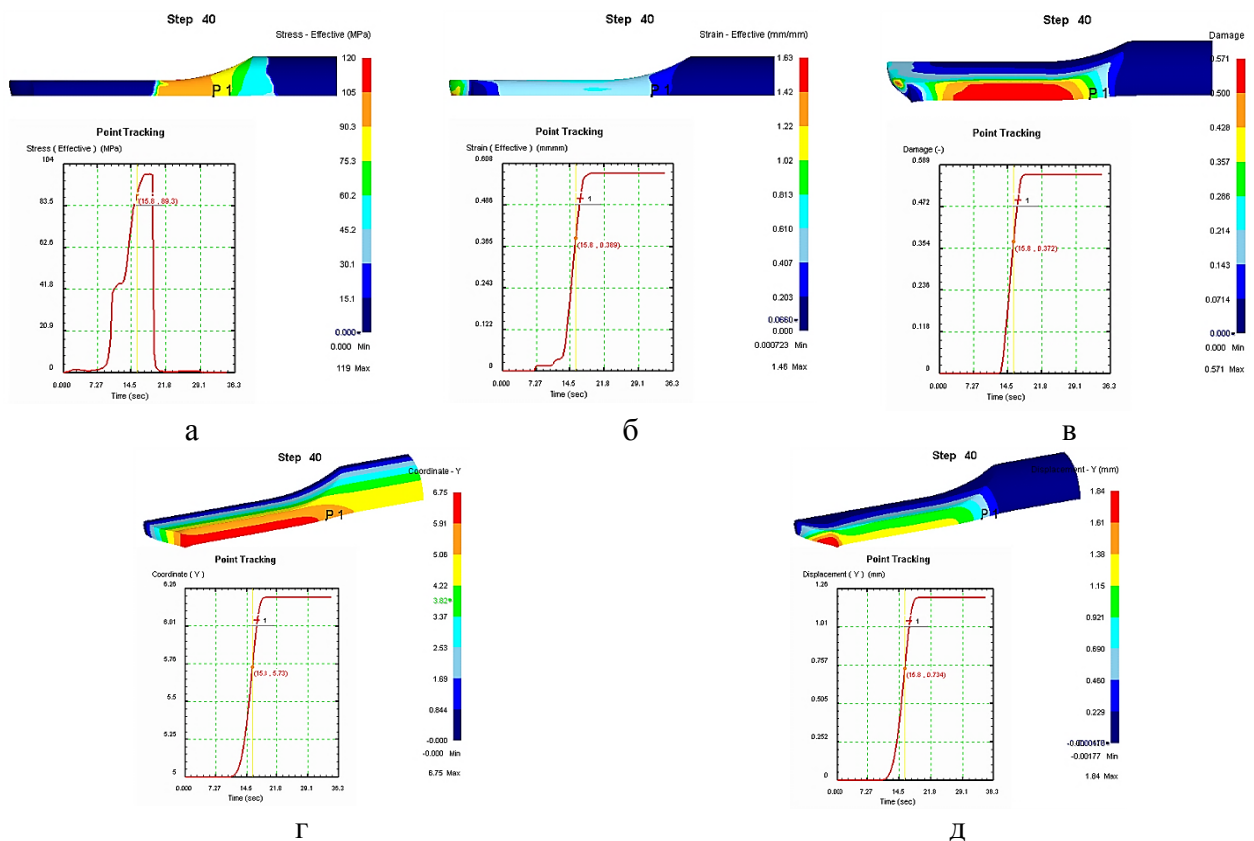


Рис. 7. Історія зміни параметрів деформівності потенційно небезпечної точки P1 заготовки при вальцюванні:

а – інтенсивності напружень; б – накопиченої деформації; в – накопичених пошкоджень; г, д – формозміни

Для врахування особливостей механіки формозміни залежність  $\varepsilon_z = f(\varepsilon_y)$  конструювали у вигляді диференціального рівняння [11]:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_y} = -\frac{\xi \cdot \varepsilon_y^2 + 2 \cdot m^2}{\varepsilon_y^2 + m^2}, \quad m > 0, \quad \frac{1}{2} \leq \xi \leq 2, \quad (3)$$

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

$$\varepsilon_z = -\xi \cdot \varepsilon_y - (2 - \xi) \cdot m \cdot \arctg\left(\frac{\varepsilon_y}{m}\right). \quad (4)$$

Для здобуття, на основі залежності (4), аналітичного опису траєкторії деформацій, доцільно перейти до її параметричного представлення [11]:

$$\begin{cases} \varepsilon_y = m \cdot tg(t); \\ \varepsilon_z = -m \cdot (\xi \cdot tg(t) + (2 - \xi) \cdot t); \end{cases} \quad t \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right]. \quad (5)$$

Значення параметрів  $m, \xi$  визначається методом найменших квадратів. Оскільки даний метод приводить до необхідності розв'язання трансцендентного рівняння складної структури, то значення указаних параметрів визначали реалізацією безпосередньої мінімізації за допомогою стандартної команди додаткового пакету Optimization системи Maple та перевіряли отримані значення із допомогою надбудови Microsoft Excel Solver. Отримані результати апроксимування залежності між деформаціями представлено на рис. 8.

Використовуючи указану комбіновану методику та отримані значення параметрів апроксимування залежностей між компонентами деформацій  $\varepsilon_z$  та коловою  $\varepsilon_y$ , які отримано під час імітаційного моделювання процесу вальцювання в програмному комплексі Deform 3D, моделюємо напружено-деформований стан в точці P1 заготовки. З цією метою необхідно отримано вирази для визначення накопиченої деформації та показника напруженого стану.

Згідно (5), співвідношення для накопиченої деформації набуває вигляду [8, 9, 11]:

$$\varepsilon_u(t, m, \xi) = \frac{2}{3} \cdot m \cdot \sqrt{3} \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{\xi^2 - \xi + 1}{\cos^4(\tau)} - \frac{2 \cdot \xi^2 - 5 \cdot \xi + 2}{\cos^2(\tau)} + (2 - \xi)^2} \cdot d\tau. \quad (6)$$

Використання теорії течії та умови відсутності радіального напруження на бічній поверхні надало можливість отримати співвідношення для показника напруженого стану (2) [8, 9, 11]:

$$\eta(t, \xi) = \frac{6 \cdot (-\xi - (2 - \xi) \cdot \cos^2(t) + 1)}{\sqrt{9 + 3 \cdot (1 - 2 \cdot \xi - 2 \cdot (2 - \xi) \cdot \cos^2(t))^2}}. \quad (7)$$

Використовуючи співвідношення (6) та (7), побудовано траєкторію деформацій відповідно до комбінованої методики імітаційного та експериментально-аналітичного моделювання (рис. 9).

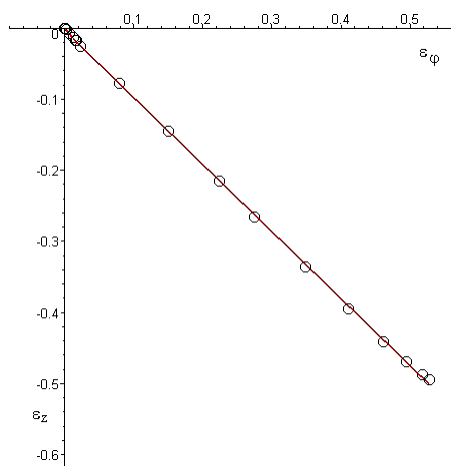


Рис. 8. Значення деформацій, які отримано під час імітаційного моделювання процесу вальцювання в програмному комплексі Deform 3D, та їх апроксимація залежністю (5): параметр  $m = 0,00236$ ;  $\xi = 0,94144$ , сума квадратів відхилень дорівнює 0,000055.

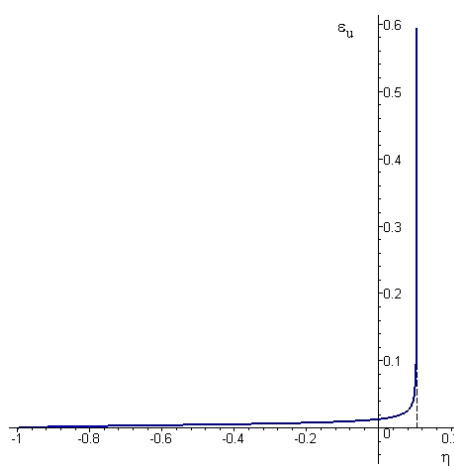


Рис. 9. Траєкторія деформацій потенційно небезпечної точки P1 на вільній поверхні циліндричного зразка відповідно до комбінованої методики (розрахунки за співвідношеннями (6), (7))

## ВИСНОВКИ

Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану точки P1 в програмному комплексі Deform 3D свідчить, що на вільній бічній поверхні заготовки при відзначених вище параметрах вальцювання буквально на початкових етапах деформування реалізується стабільний напружений стан, близький до одноосного розтягу. Проведене дослідження НДС точки P1 заготовки при вальцюванні відповідно до комбінованої методики, в якій використовували отриману в Deform 3D залежність між компонентами деформацій, також свідчить, що на вільній бічній поверхні на початкових етапах деформування реалізується стабільний напружений стан, але він відповідає комбінуванню зсуву та розтягу. Отримані результати моделювання потребують додаткового дослідження, що є одним із напрямків подальших досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки подготовительных ручьев / Скрябин С. А., Гунько И. В., Чайка Д. С., Бубновская И. А. // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3(24). – С. 76–81.*
2. *Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Выща шк., 1983. – 200 с.*
3. *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.*
4. *Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1998. – 195 с.*
5. *Добранюк Ю. В. Моделювання 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.*
6. *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 доступа: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es10\\_maggtu2.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_maggtu2.pdf).*
7. *Михалевич В. М. Моделирование предельных деформаций на свободной поверхности при осесимметричной осадке / В. М. Михалевич, В. А. Краевський, Ю. В. Добранюк // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : матер. междунар. научн.-техн. конф. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2009. – С. 108–112.*
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, Yu. V. Dobranyuk // Strength of Materials. – Volume 43, Number 6 (2011), P. 591–603, DOI: 10.1007/s11223-011-9332-7.*
10. *Скрябин С. А. Исследование неравномерности деформации и распределения температурного поля в очаге деформации с учетом развития деформации во времени / С. А. Скрябин, И. В. Гунько, И. А. Бубновская // Технологические системы : науч.-техн. журнал. – Киев : Технологические системы, 2011. – № 1(54). – С. 50–53.*
11. *Гунько І. В. Оцінка граничних можливостей процесу та деформівності матеріалів при формуванні заготовок вальцюванням / І. В. Гунько // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 47(953). – С. 23–28.*

Гунько І. В. – канд. техн. наук, проф., проректор ВНАУ.

ВНАУ – Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця.

E-mail: : maniy@ukr.net