

**Штуць А.А.**

к.т.н. ст. викладач

**Бабин І.А.**

к.т.н., доцент

**Луц П.М.**

к.т.н., ст. викладач

**Руткевич В.С.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний  
аграрний університет****Shtuts A.**

Ph.D., Senior Lecturer

**Babyn I.**

Ph.D., Associate Professor

**Luts P.**

Ph.D., Senior Lecturer

**Rutkevych V.**

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 621.73.043.62-52****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-6****МОДЕЛЮВАННЯ ТА  
ВИМІРЮВАННЯ ВИСАДЖУВАННЯ  
ЗОВНІШНІХ БУРТІВ НА ТРУБНИХ  
ЗАГОТОВКАХ ПРОЦЕСУ  
ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ  
МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Штампкування обкочуванням (ШО) є ефективним процесом для обробки сталей та сплавів у холодному стані, що дозволяє отримувати деталі складного профілю. Для вдосконалення процесів ШО важливим є вивчення факторів, що впливають на формозміну та напружено-деформований стан матеріалу заготовки. Дослідження висаджування зовнішніх буртів на трубних заготовках є трудомістким через складність врахування реальних умов локального деформування та контактних взаємодій інструменту із заготовкою. Альтернативою експериментальним методам є використання імітаційного моделювання з методом скінчених елементів (МСЕ).

У дослідженні було застосовано МСЕ для моделювання висаджування буртів на трубних заготовках, де за основу була прийнята модель, що складається з трубної заготовки, конічного валка, матриці та оправки. Розрахунки виконувалися з використанням 8-вузлових скінчених елементів, а інструмент був змодельований як абсолютно тверде тіло. Контакт між валком і заготовкою визначався автоматичним контактним алгоритмом типу «поверхня-поверхня». Результати розрахунків показали інтенсивність деформацій в перерізі бурта після 55 секунд осаджування, а також мікроструктуру матеріалу та розподіл інтенсивності деформацій і напружень.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало, що відмінності у формі бурта та розподілі інтенсивності деформацій знаходяться в межах похибки, що не перевищує 10-12%. Також, зміна коефіцієнта тертя не призвела до значних змін у напруженому стані на вільній поверхні бурта. Дослідження підтвердило хорошу відповідність параметрів напружено-деформованого стану, отриманих моделюванням, експериментальним даним, хоча для внутрішніх точок перерізу бурта спостерігалися деякі відмінності.

Ці результати демонструють високу ефективність використання МСЕ для моделювання процесу висаджування буртів у ШО, що дозволяє точніше прогнозувати характеристики деформацій та напруженого стану матеріалу заготовки.

**Ключові слова:** штампкування обкочуванням, висаджування зовнішніх буртів, трубні заготовки, метод скінчених елементів, моделювання, деформації, напружено-деформований стан, контактні взаємодії, холодна обробка металів, конічний валок, експериментальні дослідження.



**Постановка проблеми.** Штампування обкочуванням (ШО) є одним з ефективних процесів для обробки металів в холодному стані, що дозволяє отримувати деталі складної форми з високими механічними властивостями. Це технологічний процес, який застосовується для обробки сталей і сплавів, особливо в тих випадках, коли необхідно отримати компоненти з високою точністю розмірів і з мінімальними витратами матеріалу. ШО є важливим етапом у виробництві таких виробів, як труби, втулки, фланці та інші деталі, що використовуються в різних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, енергетиці та нафтовій промисловості. Однак, незважаючи на широке застосування цієї технології, існує ряд проблем, які ускладнюють її подальший розвиток і вдосконалення.

Однією з основних проблем є складність вивчення процесу формозміни та напружено-деформованого стану матеріалу заготовки під час ШО. Процес висаджування зовнішніх буртів на трубних заготовках є досить складним і трудомістким, оскільки він включає в себе ряд взаємодій між різними елементами технологічного процесу: заготовкою, інструментом (валком, матрицею та оправкою), а також контактними умовами. Точне визначення параметрів деформацій і напружень у різних точках заготовки є важливим для забезпечення високої якості продукції та запобігання дефектам, таким як тріщини або надмірне зношування інструменту.

Теоретичні методи дослідження процесу ШО мають суттєві недоліки, що обмежують їх точність і застосовність. Зокрема, проблеми виникають через необхідність врахування численних допущень, які не завжди відповідають реальним умовам процесу. Одним з таких недоліків є неадекватність припущень щодо природи реальних процесів локального деформування. Багато теоретичних моделей не можуть адекватно відтворити складні взаємодії між заготовкою і інструментом, а також врахувати зміни форми заготовки на кожному етапі процесу. Крім того, важко точно оцінити вплив контактних умов, таких як тертя між заготовкою та інструментом, на розподіл напружень і деформацій у матеріалі.

Враховуючи складність і трудомісткість експериментальних досліджень, альтернативою теоретичному аналізу та експериментам є використання методів числового моделювання, зокрема методу скінчених елементів (МСЕ). Цей метод дозволяє більш точно і детально змодельовувати процеси, що відбуваються під час ШО, враховуючи всі важливі фактори, такі як контактні умови, тертя, геометрію інструментів та заготовок, а також механічні властивості матеріалів. Моделювання процесу висаджування буртів на трубних заготовках за допомогою МСЕ дозволяє отримати невичерпну інформацію про

розподіл деформацій, напружень та інших параметрів, що важливі для оптимізації технологічного процесу.

Однак, незважаючи на численні переваги МСЕ, існують певні проблеми, пов'язані з точністю та ефективністю моделювання. Однією з таких проблем є вибір правильної моделі для опису фізичних явищ, що відбуваються під час процесу ШО. Для отримання достовірних результатів необхідно правильно вибрати параметри матеріалу, врахувати геометрію заготовки та інструментів, а також визначити відповідні контактні умови. Крім того, важливо правильно налаштувати числову модель для забезпечення точності розрахунків і мінімізації помилок, які можуть виникнути через наближення або спрощення в моделюванні.

Існуючі моделі та методи числового моделювання, хоча і дають загальне уявлення про процеси, що відбуваються під час ШО, все ж потребують подальшого вдосконалення для досягнення більшої точності. Для цього необхідно проводити додаткові дослідження, що включають порівняння результатів моделювання з експериментальними даними, а також удосконалення методів обчислення та алгоритмів для більш ефективного та точного опису процесів висаджування буртів.

Одним з важливих аспектів є вивчення впливу різних параметрів, таких як швидкість деформації, температура, коефіцієнт тертя, а також механічні властивості матеріалу на процес висаджування буртів. Зміни в цих параметрах можуть значно вплинути на кінцевий результат процесу, тому їх точне визначення є необхідним для оптимізації технології ШО. Крім того, важливим є дослідження впливу геометрії інструментів та заготовок на якість обробки, що дозволяє удосконалювати конструкцію інструментів і підвищувати ефективність процесу.

Таким чином, проблема оптимізації процесу ШО та вдосконалення методів числового моделювання є актуальною і потребує подальших досліджень. Використання МСЕ дозволяє значно покращити точність прогнозування результатів процесу, що в свою чергу дозволяє підвищити якість продукції, знизити витрати матеріалу та енергії, а також зменшити час на проведення досліджень і оптимізацію технологічних параметрів [4,5,7].

#### **Мета та завдання дослідження.**

Метою роботи є розробка та вдосконалення методів моделювання і вимірювання процесу висаджування зовнішніх буртів на трубних заготовках в процесі штампування обкочуванням (ШО) за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ). Це включає точне прогнозування руйнівних деформацій та напруженого стану матеріалу заготовки, враховуючи реальні умови локального



деформування та контактних взаємодій між інструментом і заготовкою. Метою є також порівняння результатів моделювання з експериментальними даними для підтвердження ефективності методу МСЕ, визначення впливу параметрів, таких як тертя та геометрія інструментів, на кінцеві характеристики оброблених виробів, а також удосконалення технології ШО для підвищення якості продукції та зниження витрат матеріалу та енергії.

#### Матеріал і результати дослідження.

Штамування обкочуванням (ШО) дозволяє обробляти в холодному стані сталі та сплави і отримувати деталі складного профілю. Для розвитку і вдосконалення процесів ШО важливим є дослідження факторів впливу на характер формозміни та напружено-деформований стан матеріалу заготовки. Дослідження факторів впливу на процес висаджування буртів ШО є досить трудомістким. До суттєвих недоліків теоретичних методів дослідження слід віднести неадекватність необхідних допущень природі реальних процесів локального деформування, складність врахування контактних умов і правильної оцінки формозміни заготовки на кожному етапі розкочування тощо. Альтернативою експериментальному дослідженню і теоретичному аналізу є використання імітаційного моделювання процесів ШО з використанням методу скінчених елементів (МСЕ) [5].

Одним з основних факторів, що обмежують технологічне застосування процесів холодного ШО, є руйнування металу в процесі пластичної деформації. Програмний комплекс DEFORM-3D має вбудовані засоби прогнозування руйнування при холодному

штамуванні. Критерієм «за замовчуванням» є критерій Cockroft-Latham [1]:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_i} \frac{\langle \sigma_1 \rangle}{\sigma_i} \cdot d\bar{\epsilon}_i = C \quad (1.1)$$

$$\text{де } \langle \sigma_1 \rangle = \begin{cases} \sigma_1, & \sigma_1 \geq 0 \\ 0, & \sigma_1 < 0 \end{cases} \text{ - максимальне}$$

головне розтягуюче напруження;  $C$  – константа матеріалу.

У працях [1] показано, що стосовно стаціонарного холодного деформування ( $\eta = \text{const}$ ) модель (1.1) стає тотожною співвідношенню.

З цього співвідношення випливає, що:

$$\lim_{\eta \rightarrow -1+0} \bar{\epsilon}_{fs}(\eta) = \infty \quad (1.2)$$

Це означає, що за умови рівномірного стиску розрахункове значення величини накопичених пошкоджень дорівнює нулю незалежно від величини накопиченої пластичної деформації. Іншими словами накопичення пошкоджень, що закладена в програмний комплекс DEFORM-3D, не описує можливість руйнування зразків за умови напруженого стану рівномірного стиску.

Цей самий висновок отримано на основі проведення безпосереднього моделювання за допомогою цього комплексу в праці [1].

Алгоритм моделювання наскрізних [1] технологічних процесів у програмних комплексах скінчено-елементного моделювання типу DEFORM-3D для процесів штамування обкочуванням представлено на рисунку 1.



Рис. 1. Алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів виробництва в програмних комплексах скінчено-елементного моделювання типу DEFORM-3D.



При дослідженні операції висаджування ШО на трубних заготовках зовнішніх буртів з вільною поверхнею за допомогою МСЕ в якості розрахункової була прийнята модель, що

складається з трубної циліндричної заготовки, деформуючого конічного валка, матриці та оправки (рис. 2) [1,5,7].



Рис. 2. Скінчено-елементна модель висаджування розкочуванням зовнішніх буртів на трубній заготовці

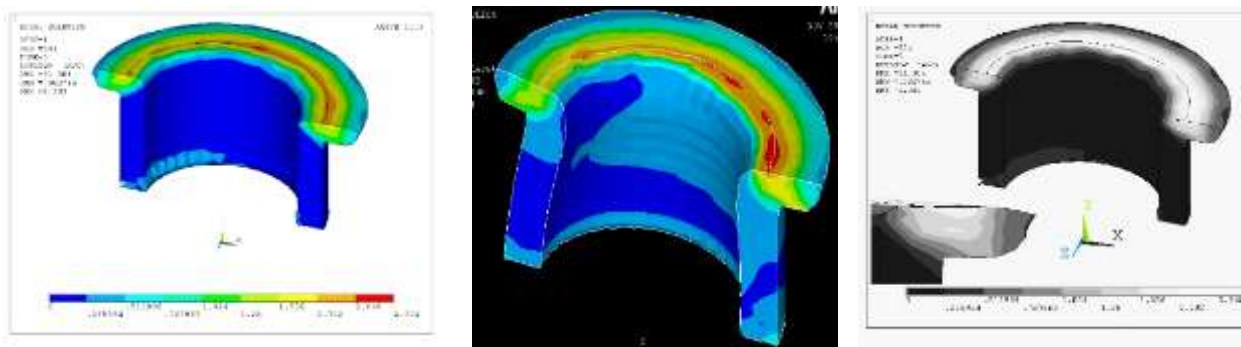


Рис. 3. Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_{I=const}$  в перерізі бурта, отриманий МСЕ [5,7].

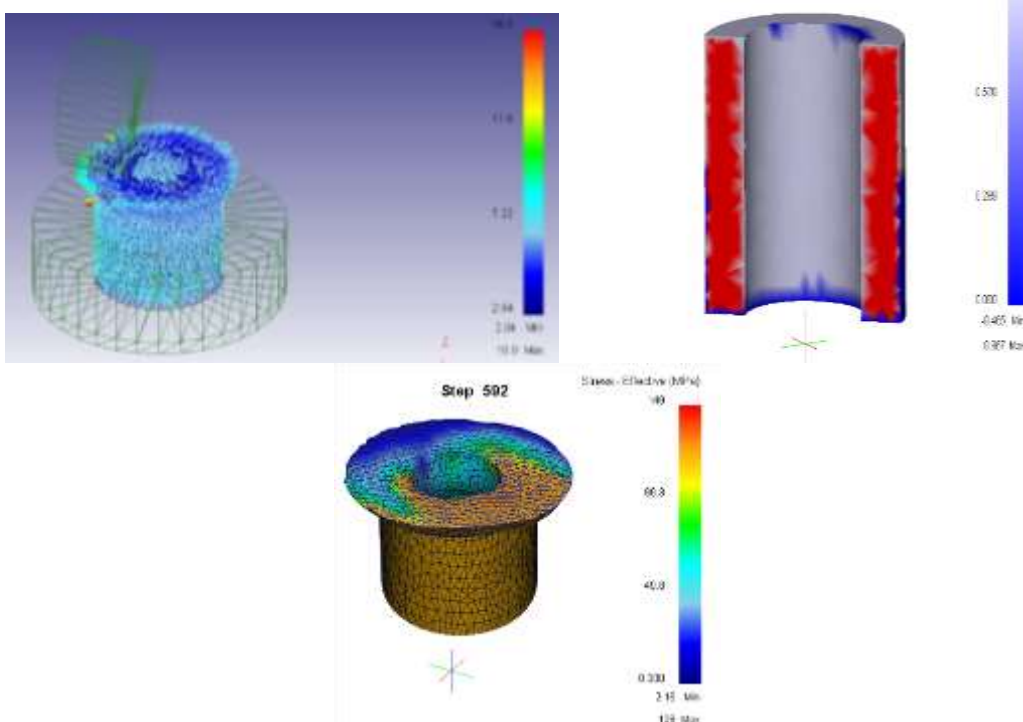


Рис. 4. Розподілення накопичення пошкоджень в об'ємі трубної заготовки при ШО: а) на 35 кроці ШО; в) на 592 кроці ШО кінцевий крок деформування.

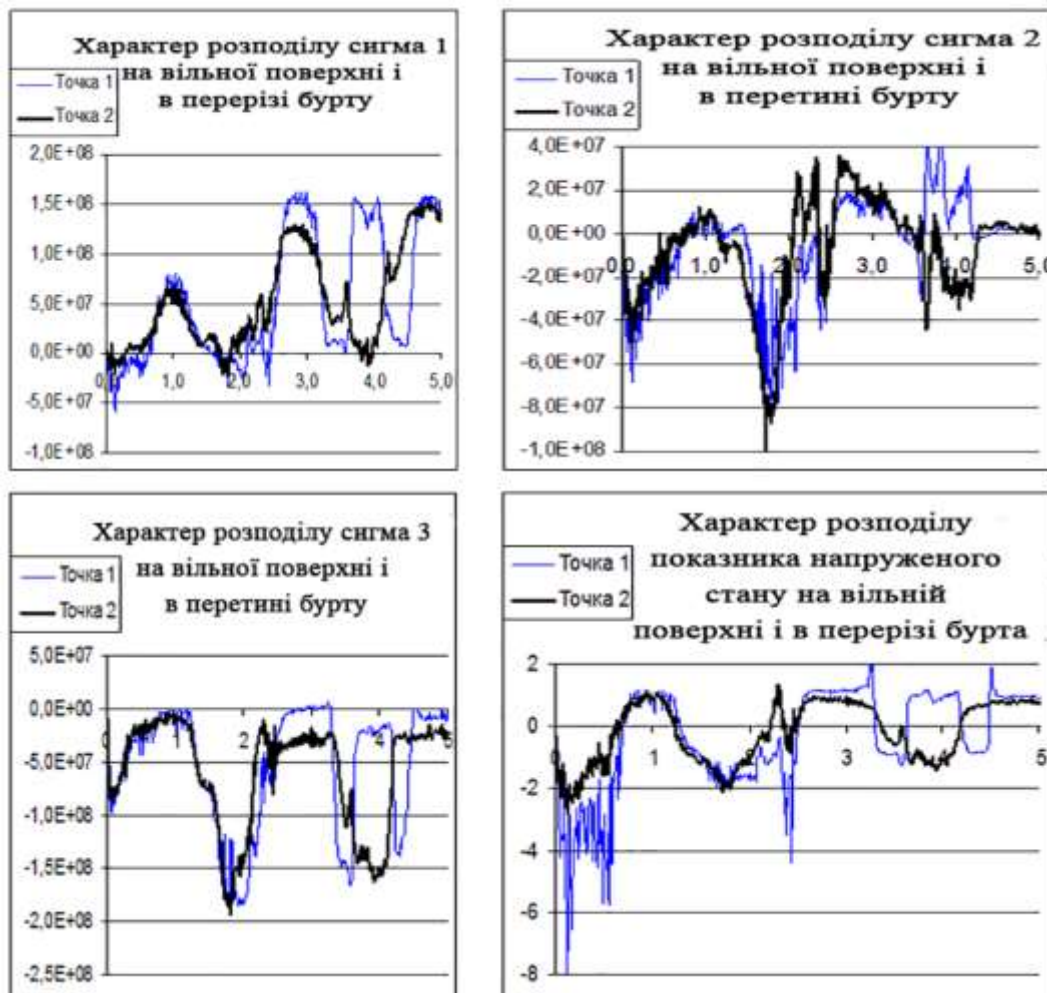
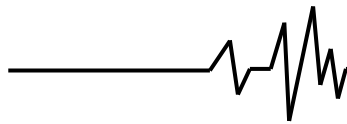


Рис. 5. Характер розподілу інтенсивності напружень на вільній поверхні і в перерізі бурту.

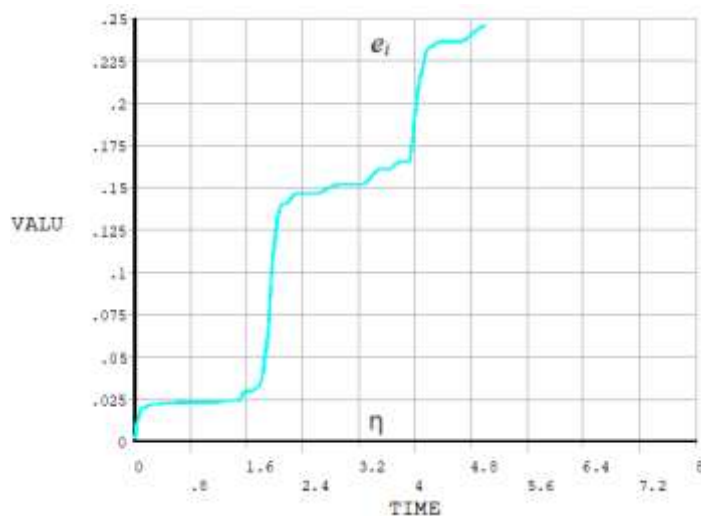


Рис. 5. Траєкторія деформування для точки трубного зразка, що побудована за результатами числового моделювання на протязі [1].

При розрахунках були використані 8-вузлові скінченні елементи. Для зменшення розрахункового часу інструмент був представлений у вигляді абсолютно твердого тіла. На валок були накладені наступні граничні умови:

він може переміщатися вздовж осі заготовки та обертатися навколо даної осі [4,5,7]. Переміщення вздовж осей поперечного перерізу в процесі розкочування відсутнє. Контакт між валком і заготовкою визначається за допомогою





автоматичного контактного алгоритму типу «поверхня-поверхня».

На рис. 3 та 4 представлені результати розрахунків інтенсивності деформацій в перерізі бурта через п'ять секунд осаджування ШО.

На рис. 6 показана мікроструктура матеріалу, а на рис. 7 характер розподілу ізоліній інтенсивності деформацій і напружень в перерізі зовнішнього бурта трубної заготовки із сталі 30ХГСА [7].

Порівняння значень параметрів НДС, отриманих розрахунковим та експериментальним шляхом показало, що відмінність форми бурта і характеру розподілу в його перерізі інтенсивності деформацій знаходиться у межах похибки, яка не перевищує 10-12%. Не перевищує вказаних розбіжностей і значення показника жорсткості напруженого стану для точок вільної поверхні бурта, який змінюється від  $\eta = -1$  на початкових стадіях розкочування, та досягає значень  $\eta = 0 \dots +1$ , на заключних етапах висаджування бурта [4].

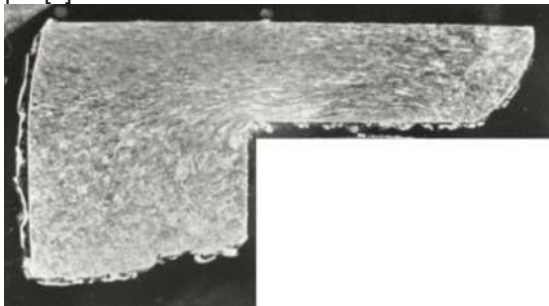


Рис. 6. Мікроструктура матеріалу поперечного перерізу бурта

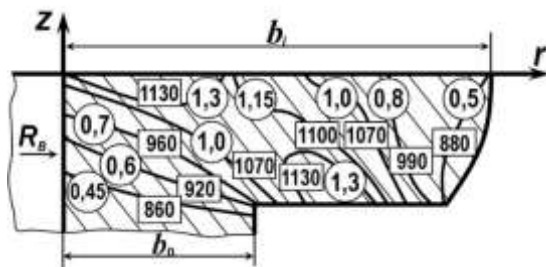


Рис. 7. Характер розподілу в перерізі параметрів  $\varepsilon_{i=const}$ ,  $\sigma_{i=const}$  за результатами вимірювання твердості [4].

Близьким до нуля на вільній поверхні бурта у фазі деформування є середнє головне напруження  $\sigma_2$ , що також відповідає результатам експерименту. Зміна коефіцієнту тертя від  $\mu = 0,1$  до  $\mu = 0,2$ , для досліджуваного взаємного положення валок-заготовка, не привело до значної зміни напруженого стану на вільній поверхні бурта [4].

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про хорошу відповідність параметрів НДС, отриманих моделюванням МСЕ

процесів висаджування ШО зовнішніх буртів на трубних заготовках даним, отриманим за результатами експериментів. Разом з тим, завищеними за абсолютною величиною, у порівнянні з результатами експериментів, виявилися значення показника  $\eta$  для внутрішніх точок перерізу бурта [4,5,7].

#### Висновки

У даній науковій роботі було проведено моделювання та вимірювання висаджування зовнішніх буртів на трубних заготовках процесу штампування обкочуванням методом скінчених елементів.

Ефективність моделювання методом скінчених елементів (МСЕ): Використання методу скінчених елементів для моделювання процесу висаджування зовнішніх буртів на трубних заготовках показало високу точність у прогнозуванні напружено-деформованого стану матеріалу. Результати моделювання в межах похибки 10-12% відповідають експериментальним даним, що підтверджує ефективність МСЕ для аналізу складних процесів локального деформування.

Вплив параметрів процесу на результати: Дослідження показало, що зміна коефіцієнту тертя між заготовкою та інструментом не суттєво впливає на напружений стан на вільній поверхні бурта. Це свідчить про стабільність моделі та її здатність враховувати контактні взаємодії в реальних умовах.

Порівняння моделювання з експериментом: Незначні відмінності у формі бурта та розподілі інтенсивності деформацій для внутрішніх точок перерізу вказують на необхідність подальшого вдосконалення моделі. Однак загальна відповідність експериментальним даним підтверджує доцільність використання МСЕ для оптимізації технологічного процесу.

Практичні переваги використання МСЕ: Моделювання дозволяє зменшити кількість експериментів, оптимізувати конструкцію інструментів та технологічні параметри процесу штампування обкочуванням, що сприяє зниженню витрат матеріалів та енергії.

Подальші перспективи дослідження: Для підвищення точності моделювання необхідно дослідити вплив додаткових параметрів, таких як температура, швидкість деформації та мікроструктурні зміни в матеріалі. Важливим є також розробка більш складних алгоритмів для врахування неоднорідності механічних властивостей матеріалів.

Загалом, проведене дослідження демонструє, що метод скінчених елементів є потужним інструментом для аналізу та вдосконалення процесів штампування обкочуванням. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації виробничих процесів у машинобудуванні та інших галузях промисловості.

**Список використаних джерел**

1. Штуть А.А. Удосконалення процесів штампування обочуванням на основі моделювання механіки формоутворення заготовок: Дисертація 2024 (271) с.

2. Matvijchuk, V., Shtuts, A., Kolisnyk, M., Kupchuk, I., Derevenko, I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51-58.

3. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. 2020. Vol. 844. P.168-181.

4. Матвійчук В. А. Розвиток енерго- і ресурсозберігаючих технологій заготівельного виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4 (119). С. 110-119.

5. Матвійчук В. А. Михалевич В. М. Розвиток процесів локального деформування: Теорія і практика обробки матеріалів тиском. АТ «Мотор Січ»: Монографія. 2016. С. 339-363.

6. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A., Dobranyuk Y.V. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. Volume 43, Number 6 (2011), P. 591-603.

7. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Краєвський О. В. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. – № 2(8). С. 56-64.

8. Sheykin S.Y., Grushko O.V., Melnichenko V.V., Studenets S.F., Rostotskiy I.Y., Iefrosinin D.V., Melnichenko Y.V. On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products. *Journal of Superhard Materials*, 43 (3). 2021. pp. 222-230.

9. Турич В.В., Руткевич В.С. Визначення режимів обробки в процесі ультразвукового вигладжування з попереднім зазором. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 4 (99). С. 104–107.

10. Веселовська Н.Р., Турич В.В., Руткевич В.С. Контактна взаємодія інструмента з деталлю у процесах поверхневого пластичного деформування з ультразвуком. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2 (85). С. 51–58.

**References**

1. Shtuts A.A. (2024). Doslidzhennia tekhnolohichnoho protsesu vnesennia ridkykh dobyv u grunt. [Improvement of rolling stamping processes on the basis of modeling of the mechanics of forming

blanks]. Dissertation, 271. [in Ukrainian].

2. Matvijchuk, V., Shtuts, A., Kolisnyk, M., Kupchuk, I., Derevenko, I. (2022). Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. Vol. 66, № 1. P. 51-58. [in Hungary].

3. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. (2020). Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. Vol. 844. P.168-181. [in Switzerland].

4. Matvijchuk V. A. (2022). Rozvytok enerho- i resursozberihayuchykh tekhnolohiy zahotivelnoho vyrobnytstva. [Development of energy- and resource-saving technologies of procurement production]. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. 2022. № 4 (119). P. 110-119. [in Ukrainian].

5. Matvijchuk V. A. Mikhalevich V. M. (2016). Rozvytok protsesiv lokal'nogo deformuvannya: Teoriya i praktyka obrobky materialiv tyskom. АТ «Мотор Січ». [Development of processes of local deformation: Theory and practice of processing materials by pressure. JSC "Motor Sich"]. Monograph, P. 339-363. [in Ukrainian].

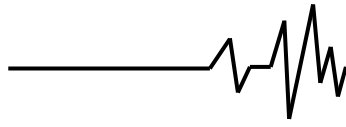
6. Mikhalevich V. M., Lebedev A. A., Dobranyuk Y.V. (2011). Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength of Materials*. Volume 43, № 6, P. 591-603. [in USA].

7. Mikhalevich V. M., Dobranyuk Yu. V., Kraevsky O. V. (2018). Porivnyal'ne doslidzhennya modeley hranychnykh plastychnykh deformatsiy. [Comparative study of models of limit plastic deformations]. *Herald of mechanical engineering and transport*. № 2(8). P. 56-64. [in Ukrainian].

8. Sheykin S.Y., Grushko O.V., Melnichenko V.V., Studenets S.F., Rostotskiy I.Y., Iefrosinin D.V., Melnichenko Y.V. (2021). On the Contact Interaction between Hard-Alloy Deforming Broaches and a Workpiece during the Shaping of Grooves in the Holes of Tubular Products. *Journal of Superhard Materials*, 43 (3), P. 222-230. [in USA].

9. Turych V.V., Rutkevich V.S. (2017). Vyznachennya rezhyimiv obrobky v protsesi ul'trazvukovoho vyhladzhuvannya z poperednim zazorom. [Determination of processing modes in the process of ultrasonic smoothing with a preliminary gap]. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. № 4 (99). P. 104–107. [in Ukrainian].

10. Veselovska N.R., Turych V.V., Rutkevich V.S. (2017). Kontaktna vzayemodiya instrumenta z detallyu u protsesakh poverkhnevoho plastychnoho deformuvannya z ul'trazvukom. [Contact interaction of the tool with the part in the processes of surface plastic deformation with ultrasound]. *Vibrations in engineering and technology*. № 2 (85). P. 51–58. [in Ukrainian].



### MODELING AND MEASUREMENT OF FLARING OF OUTER FLANGES ON PIPE BLANKS IN THE ROLL STAMPING PROCESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Roll stamping (RS) is an efficient process for shaping steels and alloys in a cold state, enabling the production of complex-profile parts. To improve RS processes, it is crucial to study the factors influencing material deformation and the stress-strain state of the blank. Research on flaring of outer flanges on pipe blanks is labor-intensive due to the complexity of accounting for real conditions of localized deformation and the contact interactions between the tool and the blank. An alternative to experimental methods is the use of simulation modeling with the finite element method (FEM).

In this study, FEM was applied to model flange flaring on pipe blanks, based on a model consisting of a pipe blank, a conical roller, a die, and a mandrel. Calculations were performed using 8-node finite elements, with the tool modeled as a perfectly rigid body. Contact between the roller and the blank was defined using an automatic "surface-to-surface" contact algorithm. The results of the calculations

revealed the deformation intensity in the flange cross-section after 55 seconds of compression, as well as the material microstructure and the distribution of deformation intensity and stresses.

Comparison of the simulation results with experimental data showed that discrepancies in flange shape and deformation intensity distribution were within an error margin not exceeding 10–12%. Additionally, changes in the friction coefficient did not significantly affect the stress state on the free surface of the flange. The study confirmed good agreement between the stress-strain parameters obtained through simulation and experimental data, although some differences were observed for internal points in the flange cross-section.

These results demonstrate the high efficiency of using FEM to model the flange flaring process in RS, allowing for more accurate prediction of deformation characteristics and the stress-strain state of the blank material.

**Key words:** stamping by rolling, external flange upsetting, tubular blanks, finite element method, modeling, deformations, stress-strain state, contact interactions, cold metalworking, conical roll, experimental studies.

#### Відомості про авторів

**Штуть Андрій Анатолійович** – к.т.н. старший викладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [shtuts1989@gmail.com](mailto:shtuts1989@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

**Бабін Ігор Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [ihorbabyn@gmail.com](mailto:ihorbabyn@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Луц Павло Михайлович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [luts@vsau.vin.ua](mailto:luts@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

**Руткевич Володимир Степанович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [y\\_rut@ukr.net](mailto:y_rut@ukr.net)). ORCID 0000-0002-6366-7772.

**Shtuts Andrii** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [shtuts1989@gmail.com](mailto:shtuts1989@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

**BABYN Ihor** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [ihorbabyn@gmail.com](mailto:ihorbabyn@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Luts Pavlo** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 1, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [luts@vsau.vin.ua](mailto:luts@vsau.vin.ua)). ORCID 0000-0002-3776-8940.

**Rutkevych Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 1, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [luts@vsau.vin.ua](mailto:luts@vsau.vin.ua)). ORCID [0000-0002-6366-7772](https://orcid.org/0000-0002-6366-7772).