

Полісан І. О.
Губський С. О.
Колісник К. Д.
Чухліб В. Л.
Ходирєв Г. П.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ГНУТТЯ ТРУБИ В ТРУБОГИБІ

У статті проведено дослідження технології згинання труби та вплив різних діаметрів валів на утворення гофрування внутрішнього перерізу труби. У ході роботи було проведено аналіз різних матеріалів труб та їх фізико-механічних властивостей, оскільки вибір матеріалу суттєво впливає на згинання. Було виконано розрахунок технологічного процесу гнуття для різних кутів згинання та товщин стінок. Для візуалізації та аналізу процесу використано програмний комплекс Fusion360. Моделювання проведено у спеціалізованій програмі QForm. Це дозволило отримати графічні залежності середніх напружень та інтенсивності напружень. Моделювання показало, що основним фактором, який впливає на якість виробу при бездорновому гнутті, є відношення радіуса згину до діаметра труби. В результаті дослідження встановили, що при зменшенні радіуса згину до 50 мм критично зростає гофроутворення та овалізація. Для отримання якісних згинів малого радіуса необхідно використовувати спеціальний дорн, який забезпечить зменшення гофрування та овалізацію готової продукції. Встановлено залежність якості гнуття від геометричних параметрів оснащення та обґрунтовано необхідність використання дорнових механізмів при малих радіусах згину.

Ключові слова: труба, гнуття, трубогиб, дорн, моделювання, QForm, гофра, радіус згину.

Виробництво гнутих трубних виробів займає важливе місце у сучасній промисловості, зокрема в автомобілебудуванні, суднобудуванні, енергетиці та будівництві. Це зумовлено високими експлуатаційними характеристиками таких виробів, які вирізняються підвищеною міцністю, стійкістю до навантажень та естетичним виглядом порівняно зі зварними з'єднаннями. Проте процес гнуття труб, особливо тонкостінних, супроводжується ризиком виникнення дефектів, таких як овалізація поперечного перерізу, потоншення стінки на зовнішньому радіусі та утворення складок (гофрів) на внутрішньому. У зв'язку з цим, удосконалення технології гнуття та прогнозування поведінки металу під час деформації є актуальним інженерним завданням.

Питання технології гнуття труб висвітлюються в багатьох наукових працях. Залежно від обсягів виробництва, гнуття може виконуватися вручну для одиничних виробів або на спеціалізованих верстатах - трубогибах для серійного виробництва [1].

З технологічної точки зору, методи деформування труб поділяються за температурним режимом.

Процес холодного гнуття базується на пластичності матеріалу і виконується без попереднього нагрівання заготовки. Метод широко застосовується для труб невеликого та середнього діаметра, виготовлених з кольорових металів (мідь, алюміній), сталі, а також для металопластикових труб, де внутрішній алюмінієвий шар фіксує надану форму [2]. Холодне гнуття має обмеження при роботі з крихкими матеріалами, наприклад, чавуном, або деякими видами полімерів, які не здатні утримувати форму після деформації.

Гаряче гнуття застосовується для труб з високою жорсткістю, великою товщиною стінки або значним діаметром (наприклад, у нафтогазовій промисловості) [3]. Попереднє нагрівання (локальне газове або індукційне) підвищує пластичність металу, що дозволяє гнути труби з меншою силою та знижує ризик руйнування [4]. Однак для полімерних труб цей метод є критичним, оскільки нагрівання може призвести до плавлення та втрати кільцевої жорсткості [5].

Ручне гнуття може бути різних видів. Це може бути намотування на шаблон, коли трубу згинають, намотуючи її на тверду форму (шаблон). Для запобігання сплюснюванню порожнини труби часто заповнюють наповнювачем – сухим піском або сіллю [6]. Цей метод ефективний для пластичних металів, але має недолік - необхідність залишати довгі технологічні кінці

труби для створення важеля, які потім обрізаються, що збільшує кількість відходів [7]. Також існує спосіб деформації на опорах, коли трубу встановлюють на дві опори, а силу прикладають по центру. Цей метод вважається менш точним і часто призводить до значної овальності перерізу та вм'ятин у місці контакту з інструментом [8].

Механізоване гнуття поділяють на 2 способи. Вальцювання – це коли труба пропускається через систему з трьох валків і де положення притискного валка визначає радіус згину [9]. Цей метод ідеально підходить для виготовлення спіралей, дуг та кілець великого радіуса, але має обмеження при роботі з малими радіусами згину [10]. Гнуття з дорном - це найбільш точний промисловий метод для отримання згинів малого радіуса на тонкостінних трубах [11]. Дорн - це спеціальна калібрована оправка (сталева або бронзова), яка розміщується всередині труби безпосередньо в зоні деформації [12]. Він механічно підтримує стінки зсередини, запобігаючи утворенню гофрів (складок) та критичній зміні геометрії перерізу. Дорни бувають жорсткими для простих згинів та кульковими або сегментними для складних згинів малого радіуса [13].

Процес згинання пов'язаний зі значними внутрішніми напруженнями, що може призводити до появи дефектів: овалізація, гофроутворення, потоншення стінки, пружиніння [14].

Розвитком згинального обладнання є верстати з числовим програмним керуванням ЧПК, такі як дорновий верстат MAST CNC MACHINEN DW50CNC-3A-1SV [15]. Це обладнання дозволяє виконувати високоточне автоматизоване гнуття труб діаметром до 38 мм при товщині стінки 3 мм на кут до 190°. Завдяки системі ЧПК забезпечується висока повторюваність виробів у серії, мінімізується вплив людського фактора та значно спрощується процес переналагодження верстата для виготовлення складних просторових деталей.

Експериментальний підбір параметрів гнуття є витратним процесом і тому все частіше застосовується моделювання методом скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє спрогнозувати напружено-деформований стан (НДС) заготовки ще на етапі проєктування технології [12].

Мета дослідження – дослідження впливу радіуса згинання (діаметра нерухомого валу) на виникнення дефектів форми труби шляхом комп'ютерного моделювання в програмному комплексі QForm.

Об'єктом дослідження є технологія гнуття сталевих труб в трубогибі. Для реалізації поставленої мети було використано методи комп'ютерного моделювання та обчислення за формулами.

Розрахунок процесу гнуття - це змінна величина, що визначається типом труби, її матеріалом, діаметром, товщиною стінки та заданим кутом деформації. Втім, незважаючи на розбіжність у вхідних даних, базова послідовність етапів розрахунку є універсальною.

Крок 1. Визначення радіуса гнуття (R).

Радіус гнуття (R) – це відстань від центру труби до осі гнуття. Радіус гнуття може бути заданий виробником трубогиба або може бути обчислений за допомогою відношення діаметру труби (D) до співвідношення R/D (зазвичай виражається у відсотках).

$$R = D \times (R/D).$$

Крок 2. Обчислення довжини гнуття (L).

Довжину гнуття можна знайти за допомогою формули дугової довжини:

$$L = \frac{\theta}{360} \times 2\pi R,$$

де L – довжина гнуття, θ – кут гнуття в градусах, R – радіус гнуття.

Крок 3. Визначення параметрів нерухомої матриці (S).

S – це відстань від кінця труби до початку гнуття на трубогибі. Це значення зазвичай зазначено в технічних характеристиках трубогиба.

Крок 4. Обчислення необхідної довжини труби.

Необхідна довжина труби (L_{total}) може бути знайдена, додавши довжину гнуття (L) до розташування нерухомої матриці (S).

$$L_{total} = L + S.$$

Це надає можливість визначити загальну довжину труби, яку повинні взяти для гнуття на трубогибі.

Довжина труби для гнуття може бути розрахована за формулою:

$$L = \pi \times D \times \left(\frac{\theta}{360}\right).$$

Розгортка може бути розрахована за тією же формулою, використовуючи вказаний діаметр та кут гнуття:

$$\text{Розгортка} = \pi \times D \times \left(\frac{\theta}{360}\right).$$

Для методу комп'ютерного моделювання геометричні моделі інструменту були побудовані в програмі Fusion 360, а розрахунок напружено-деформованого стану та побудова заготовки виконано в програмі QForm.

Моделювання процесу гнуття передбачало наступні етапи:

– підготовка геометрії (створення 3D моделі валів та заготовки). Схема навантаження передбачає фіксацію труби відносно нерухомого валу та прикладання згинального моменту через рухомий вал (рис. 1);

– задання параметрів процесу. В програмі QForm обрано тип операції “General forming”. Матеріал інструменту - сталь X12МФ. Температура процесу – 20 °С;

– в вкладці граничні умови серед переліку варіантів для фіксації труби було обрано ковальський маніпулятор (Forging manipulator), що моделює роботу затискного механізму. Його можливо зробити різної форми, але в нашому випадку була обрана прямокутна;

– задання розмірів маніпулятора. Задано кінематику валів з вказанням вісей руху.

В якості основного змінного параметра дослідження було обрано діаметр нерухомого валу, який визначає внутрішній радіус згинання. Було проведено моделювання для трьох розмірів нерухомого валу: 50 мм, 100 мм та 150 мм. Діаметр рухомого валу залишався незмінним – 50 мм. Кут згину у всіх випадках становив 50°.

Модель заготовки труби була зроблена в програмі QForm, що автоматично розбиває трубу на гексагональну сітку для покращення точності розрахунків (рис. 2).

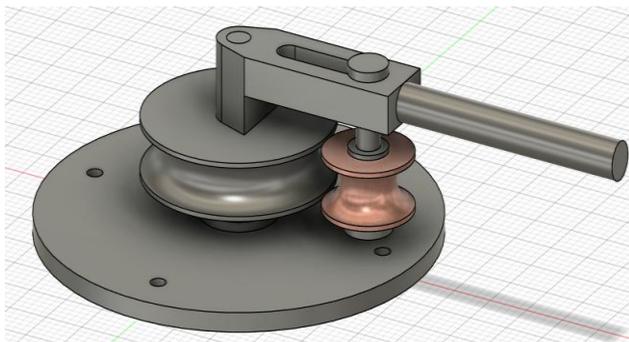


Рис. 1. Загальний вигляд трубогибу

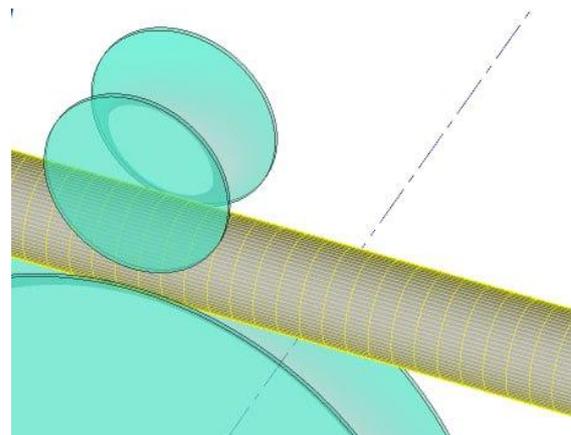


Рис. 2. Гексагональна сітка в трубі

Аналіз отриманих даних дозволяє порівняти зміну форми труби при різних радіусах згину. При застосуванні нерухомого валу діаметром 50 мм можна побачити значну концентрацію напружень. Візуалізація деформації чітко демонструє утворення вираженої складки та значну овальність профілю. Це свідчить про те, що гнуття без дорна на такий малий радіус для даного типу труби є технологічно нераціональним.

При збільшенні діаметра нерухомого валу до 100 мм та 150 мм (рис. 3) зона пластичної деформації стає більш рівномірною.

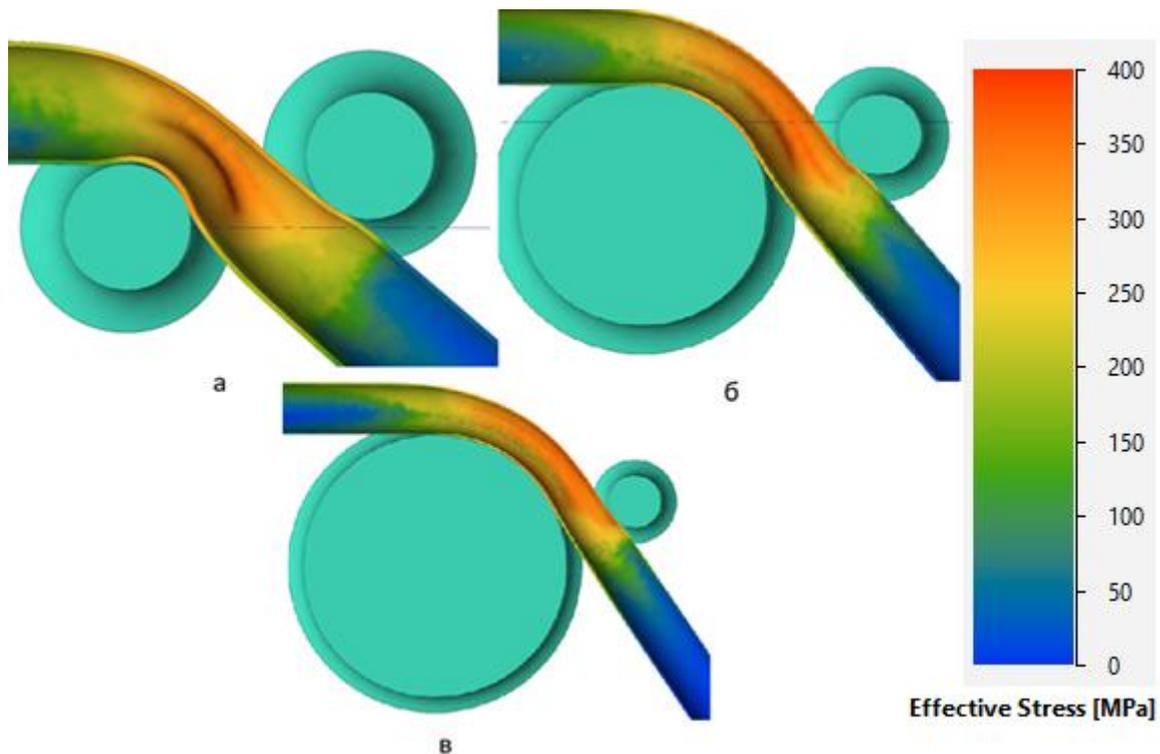


Рис. 3. Інтенсивність напружень при використанні нерухомого валу різного діаметру (а – 50, б – 100, в – 150 мм)

Моделювання наглядно показало залежність між радіусом згину та інтенсивністю утворення дефектів: збільшення діаметра нерухомого валу впливає на зменшення кількості складок. При роботі з валом діаметром 150 мм профіль труби у перерізі показує найкращі показники якості продукції.

На рис. 4 наведено залежність пластичної деформації від діаметру нерухомого валу 50 та 150 мм. На цих діаграмах спостерігається різниця більше ніж в два рази, що свідчить про значну різницю при деформуванні при використанні різного діаметру нерухомого валу.

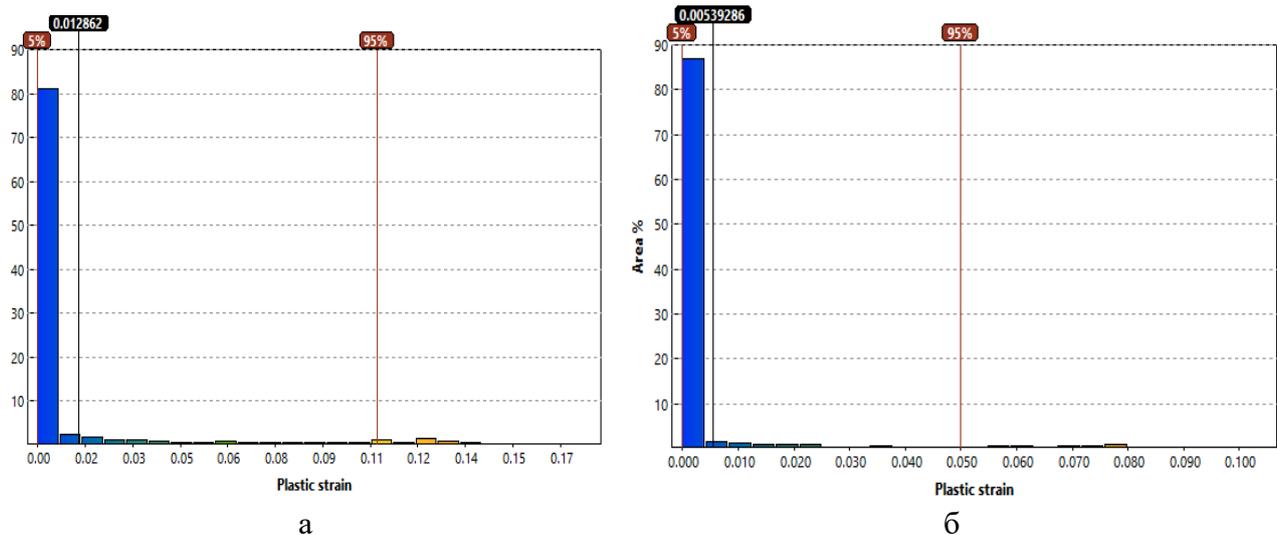


Рис. 4. Залежність показників пластичної деформації від діаметру нерухомого валу (а – 50, б – 150 мм).

ВИСНОВКИ

Виконано дослідження технології гнуття труб із застосуванням програм QForm та Fusion 360. Моделювання показало, що основним фактором, який впливає на якість виробу при бездорновому гнутті, є відношення радіуса згину до діаметра труби. В результаті дослідження встановили, що при зменшенні радіуса згину до 50 мм критично зростає гофрування та овалізація. Для отримання якісних згинів малого радіуса необхідно використовувати спеціальний дорн, який забезпечить зменшення гофрування та овалізацію готової продукції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Tim Tronvoll, Jian Ma, Torgeir Welo. Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. P. 801–816.
2. Miller G. G. Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2003. P. 30–50.
3. Biba N., Stebunjev S. QForm: simulation of metal forming processes. 2018.
4. Tronvoll S. A., Ma J., Welo T. Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. P. 801–816. DOI: 10.1007/s00170-022-10638-9.
5. Singh H. Fundamentals of Hydroforming. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2003. P. 60–87.
6. Guo X. Flexible Metal Forming Technologies: Principles, Process and Equipment. Singapore: Springer, 2022. P. 123–250.
7. Yu T., Xue P. Introduction to Engineering Plasticity: Fundamentals with Applications in Metal Forming, Limit Analysis and Energy Absorption. Singapore: Springer, 2022. P. 60–145.
8. Kakandikar G. M., Agrawal A., Ravi Kumar D. Metal Forming Processes: Developments in Experimental and Numerical Approaches. Singapore: Springer, 2022. P. 170–200.
9. Tube Life: London's Underground in Photographs. Mirrorpix, 2018. P. 10–100.
10. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J. Mechanics of Sheet Metal Forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. P. 100–150.
11. Altan T., Tekkaya A. E. Sheet Metal Forming: Processes and Applications. Materials Park: ASM International, 2012.
12. Jiang Z., Yang H., Li H., Ren N. Theoretical investigation on the springback of thin-walled tube in rotary draw bending. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2011. Vol. 53, No. 10. P. 872–882.
13. Heng L., Yang H., Zhang H., Li G. Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211, No. 3. P. 373–384.
14. Mentella A., Strano M. Rotary draw bending of small diameter copper tubes: Predicting the cross-section deformation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012. Vol. 226, No. 2. P. 267–278.
15. Tang N. C. Plastic-deformation analysis in tube bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000. Vol. 77, No. 12. P. 751–759.

Polisan I., Hubsnyi S., Kolisnyk K., Chukhlib V., Khodyriev H. Research on technology and modeling of pipe bending in a pipe bender

The article studies the technology of pipe bending and the influence of different shaft diameters on the formation of corrugations of the internal cross-section of the pipe. In the course of the work, an analysis of different pipe materials and their physical and mechanical properties was carried out, since the choice of material significantly affects bending. The calculation of the technological process of bending was performed for different bending angles and wall thicknesses. The Fusion 360 software package was used to visualize and analyze the process. Modeling has shown that the main factor that affects the bending capacity of the pipe during mandrel bending is the relationship between the bending radius and the diameter of the pipe. As a result of the investigation, it was established that when the bending radius changes to 50 mm, corrugation and ovalization critically increases. To remove clear spots of small radius, it is necessary to use a special mandrel to ensure a change in corrugation and ovalization of the finished product. The modeling was carried out in the specialized QForm program. This allowed obtaining graphical dependences of average stresses and stress intensity. The dependence of bending quality on the geometric parameters of the equipment was established and the need to use mandrel mechanisms for small bending radii was substantiated.

Keywords: pipe, bending, pipe bender, mandrel, modeling, QForm, corrugation, bending radius.

Полісан Ігор Олегович – магістр НТУ «ХПІ»
Polisan Igor – Master, NTU «KhPI»
E-mail: Ihor.Polisan@mit.khpi.edu.ua.

Губський Сергій Олександрович – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»
Hubskiy Serhii – Candidate of Technical Science, Associate Professor NTU «KhPI»
E-mail: gubskiyso@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>

Колісник Костянтин Дмитрович – аспірант НТУ «ХПІ»
Kolisnyk Kostiantyn – Graduate student NTU «KhPI»
E-mail: kolesnik2195@gmail.com.

Чухліб Віталій Леонідович – д-р техн. наук, професор НТУ «ХПІ»
Chukhlib Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Full Professor NTU «KhPI»
E-mail: profdnepro@gmail.com.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>

Ходирєв Геннадій Павлович – старший викладач НТУ «ХПІ»
Khodyriev Hennadii – Senior Lecturer NTU «KhPI»
E-mail: khodirevgennadiy@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6347-1286>

НТУ «ХПІ» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків
NTU «KhPI» - National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

Стаття надійшла до редакції 12.10.25 р.