

**САЄНКО О.Ф., ГУБСЬКИЙ С.О., ЧУХЛІБ В.Л., СЕРГІЄНКО М.Є., КОЛІСНИК К.Д.**

## **ПІДХІД ДО ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ**

У статті проведено узагальнюючий огляд підходів до зменшення кількості технологічних переходів при зменшенні виробництва гнутих профілів. Розглянуті різні методи виробництва гнутих профілів, враховуючи вимоги до кінцевого виробу. Розроблено калібрування виготовлення коритного профілю за двома схемами калібрування. Цей розрахунок дозволяє ефективно здійснювати процес виробництва гнутих профілів і допомагає зменшити кількість технологічних переходів, що вимагаються для досягнення бажаного результату. Проведено моделювання виробництва коритного профілю та побудовані графіки, що ілюструють процес виготовлення профілю. Це дозволило візуалізувати різні аспекти технологічного процесу та з'ясувати, які методи та схеми калібрування є найбільш ефективними для досягнення мети. На основі отриманих даних були наведені обґрунтовані висновки. Ці висновки вказують на те, які підходи та методи виробництва гнутих профілів є раціональними при зменшенні кількості технологічних переходів. Результати дослідження можуть бути корисними для промислових підприємств, що займаються виробництвом гнутих профілів, допомагаючи їм обрати найбільш ефективні методи та схеми калібрування для покращення виробничого процесу та зниження витрат.

**Ключові слова:** профіль, гнуття, кліть, напруження, деформація, перехід, моделювання.

**SAIENKO O. F., HUBSKYI S. O., CHUKHLIB V. L., SERGIENKO N. Ye., KOLISNYK K. D.  
APPROACH TO REDUCING THE NUMBER OF TECHNOLOGICAL TRANSITIONS IN THE PRODUCTION OF BENT PROFILES**

The article provides a generalized overview of approaches to reducing the number of technological transitions when reducing the production of bent profiles. In particular, various methods of producing bent profiles are considered, taking into account the requirements for the final product. The calculation of calibration of the production of trough profiles according to two calibration schemes has been developed. This calculation allows for an efficient production process of bent profiles and helps to reduce the number of technological transitions required to achieve the desired result. The production of a trough profile was modeled and graphs illustrating the profile manufacturing process were created. This made it possible to visualize various aspects of the technological process and find out which methods and calibration schemes are most effective for achieving the goal. Based on the data obtained, reasonable conclusions were drawn. These conclusions indicate which approaches and methods for producing bent profiles are optimal when reducing the number of process transitions. The results of the study can be useful for industrial enterprises engaged in the production of bent profiles, helping them to choose the most effective methods and calibration schemes to improve the production process and reduce costs.

**Keywords:** profile, bending, stand, stress, deformation, transition, modeling.

**1. Вступ.** Гнуті профілі - це елементи конструкцій, отримані шляхом вигину металевих листів або інших матеріалів. Гнуті профілі мають різну форму і розмір, вони можуть бути круглими, квадратними, прямокутними, овальними та інших форм, залежно від вимог конкретної конструкції [1].

Гнуті профілі використовуються в різних галузях промисловості, таких як будівництво, автомобільна і залізнична промисловість, машинобудування тощо [2].

Для виготовлення гнутих профілів в масовому виробництві зазвичай використовують спеціальне обладнання, таке як профілезгинальні стани. Вони можуть обробляти великі листи металу і виробляти гнуті профілі у великих обсягах і з високою точністю. Також використовують ручне згинання для невеликих профілів.

**2. Методи виробництва гнутих профілів.** Існує кілька методів виробництва гнутих профілів, які застосовуються залежно від вимог до кінцевого виробу, його розмірів, форми і матеріалу. Розглянемо основні методи виробництва гнутих профілів [1, 3, 4].

Гаряче згинання - метод, за якого профіль нагрівається до високої температури і згинається під дією спеціального обладнання. Цей метод дає змогу домогтися високої точності вигину, особливо під час роботи з великими профілями.

Холодне згинання - метод, за якого профіль згинається без попереднього нагрівання. Цей метод найбільш поширений для виготовлення гнутих профілів з легких металів, таких як алюміній або сталь.

Радіальне згинання - метод, за якого профіль згинається навколо центральної вісі. Цей метод зазвичай застосовується для виготовлення круглих або овальних профілів.

Профільне згинання - метод, за якого профіль згинається в площині профілю. Цей метод застосовується для виготовлення профілів з нерівномірною геометрією.

Згинання на вальцях - метод, за якого профіль прокатується між валками, що обертаються, і згинається відповідно до їхньої форми. Цей метод часто використовується для виготовлення гнутих профілів з товстолистового металу.

Згинання на згинальних машинах - метод, за якого профіль згинають на спеціальному обладнанні - згинальній машині. Цей метод дає змогу домогтися високої точності вигину і застосовується для виготовлення складних форм і великих профілів.

Кожен метод має свої переваги та обмеження, і вибір методу залежить від вимог до кінцевого виробу.

**3. Розрахунок калібрування виготовлення коритного профілю.** Кількість переходів гнутих профілів - це кількість точок вигину, через які проходить профіль під час його виробництва. Воно визначається відповідно до міжнародних стандартів, таких як ASTM (American Society for Testing and Materials) або EN (European Standards), які встановлюють вимоги до виробництва гнутих профілів.

Для визначення кількості переходів гнутих профілів використовуються різні методи, включаючи аналітичні розрахунки та експериментальні випробування [1, 5].

© О.Ф. Саєнко, С.О. Губський, В.Л. Чухліб, М.Є. Сергієнко, К.Д. Колісник, 2023

В аналітичному методі кількість переходів розраховується на основі геометричних параметрів профілю, таких як його довжина, радіус вигину та товщина стінки. Експериментальний метод полягає у вимірі кількості переходів на готовому гнучому профілі за допомогою спеціального інструменту.

Визначення кількості переходів гнутих профілів має важливе значення для оцінки їхньої якості та відповідності вимогам проекту. Чим більше кількість переходів, тим складнішою є форма профілю, що може вплинути на його міцність та стійкість у конструкції. Оптимальна кількість переходів залежить від конкретних вимог проекту та може бути визначена на основі досвіду та експертизи фахівців у галузі виробництва гнутих профілів [6].

Для подальшого дослідження було обрано калібрування валків для виробництва коритного профіля, який має геометричні розміри 34 x 19 x 27,5 x 2 мм, Сталь 10 (рис. 1). Розрахунок буде виконуватися за двома схемами калібрування з такими переходами 0°-10°-18°-30°-42°-54°-66°-78°-88°-90° (10 переходів) та 0°-10°-30°-54°-78°-88°-90° (7 переходів).

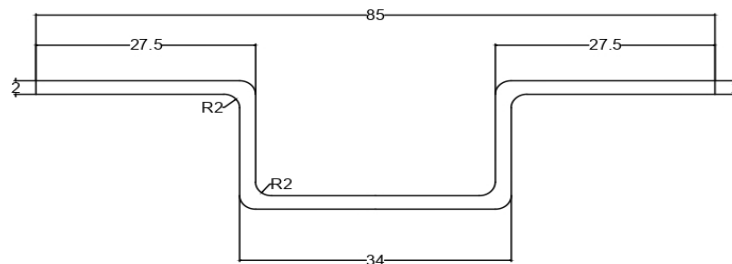


Рис. 1 – Коритний профіль, який має геометричні розміри 34 x 19 x 27,5 x 2 мм

При проектуванні профілю необхідно визначити ширину заготовки. Передбачається, що теоретична нейтральна вісь загнутої заготовки переміщується від середини товщини до внутрішнього краю заготовки, як показано на рис. 2 [1].

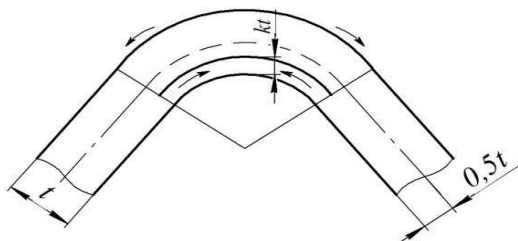


Рис. 2 – Теоретичне переміщення нейтральної вісь при згинанні заготовки

Нове положення при згинанні нейтральної вісь характеризується  $k$ -фактором (коефіцієнт зміщення нейтрального шару). Наприклад,  $k$ -фактор низьковуглецевих сталей, радіус згину яких рівний товщині заготовки, дорівнює приблизно 0,33 [7].

У дійсності при згинанні переміщення нейтральної вісь відбувається таким чином, як зображено на рис. 3.

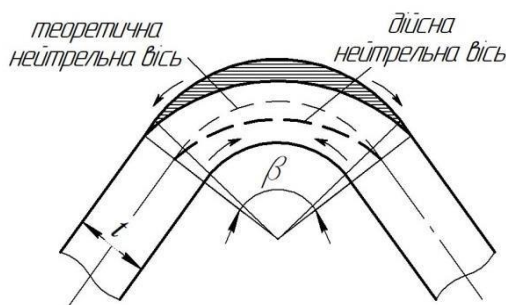


Рис. 3 – Дійсне переміщення нейтральної вісь при згинанні заготовки

Основними чинниками, що впливають на  $k$ -фактор – внутрішній радіус згинання, товщина матеріалу та механічні властивості металу.

Ширину заготовки можна визначити аналітичним, графоаналітичним або графічним методами. Вибір методу розрахунку залежить від складності перерізу профілю. Ширину заготовки зазвичай визначають за довжиною нейтрального шару профілю, який як умовно прийнято, не піддається деформації від згинання і поперечної витяжки. Результати розрахунків корегують з врахуванням потоншення металу в місцях згинання та поперечної витяжки [7, 8].

При визначенні ширини заготовки аналітичним методом переріз профілю ділять на елементарні ділянки, сума ширин яких є шириною заготовки (1)

$$L = \sum L_{\text{п}} + \sum L_3, \quad (1)$$

де  $L$  – ширина заготовки, мм;  $\sum L_{\text{п}}$  – сума ширин прямолінійних ділянок, мм;  $\sum L_3$  – сума ширин ділянок заокруглень, мм.

Загалом, за конструкцією комплект профілезгинальних валків розділяють на три групи. До першої та другої відносять валки, що виконують функцію підгинання до сумарного кута  $30^\circ$  та більше  $30^\circ$ , до  $85^\circ$  відповідно. До третьої групи відносять оздоблювальні валки.

Щоб розрахувати калібрування валків першої групи необхідно обрати спосіб калібрування та намітити положення профіля по відношенню до вісей валків. Далі необхідно визначити режим профілювання, що характеризується кутами підгинання.

Розглянемо калібрування валків для профілювання профілю по третьому методу (рис. 4) [7, 8].

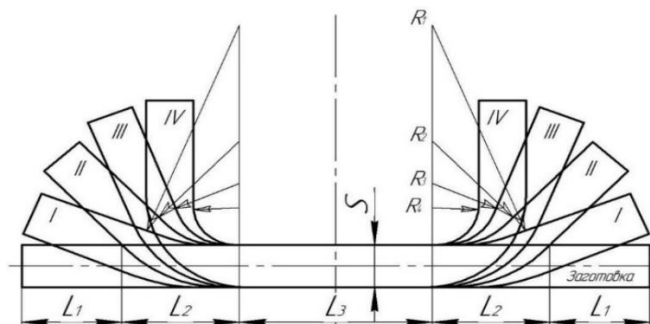


Рис. 4 – Третій метод калібрування гнутих профілів (I-IV послідовність процесу)

Третій метод необхідно застосовувати для профілів, що мають проміжні прямі ділянки, наприклад, для коритного профілю та швелерів, С-подібних і гофрованих профілів.

Деформація в окремих калібрах обмежена, так як у виробі не повинні виникати напруження, що викликають руйнування матеріалу. Тому при профілювання неможливо отримати великий кут за один прохід.

Слід враховувати основну вимогу поштучного профілювання – забезпечення плавного заходу металу в калібр. У перших калібрах профіль має малу жорсткість, заокруглення ще недостатньо намічені, тому приріст кутів підгинання обирається невеликим ( $8^\circ$ – $10^\circ$ ). У наступних проходах приріст кутів підгинання збільшується до  $12^\circ$ – $15^\circ$ . В останніх проходах через погіршення умов задання металу в калібр і значного наклепу вигнутих ділянок профілю приріст кутів підгинання приймають рівним  $2^\circ$ – $8^\circ$ .

Змінні радіуси  $R_n$  визначають в залежності від кутів підгинання кожного калібру (2)

$$R_n = \frac{180 \cdot L_2}{\pi \cdot \alpha_n} - x \cdot s, \quad (2)$$

де  $L_2$  – довжина ділянки, що підгинається, мм;  $n$  – порядковий номер калібру;  $\alpha_n$  – кут підгинання в калібру  $n$ , град.

Валки другої групи, як правило, мають відкриті калібри.

Валки третьої групи призначені для отримання кінцевих кутів. В передчистовому калібрі основу профіля прогинають так, щоб вона стала перпендикулярною до похилої стінки калібру. Кут між полицею профіля та його основою сягає  $90^\circ$ .

**4. Моделювання виробництва коритного профілю.** Для розрахунку напружено-деформованого стану при виробництві коритного профілю при різній кількості переходів нами спочатку було використано Ubeso PROFIL. Це програмне забезпечення для проектування прокатних форм для будь-якого виробника профілів холодного прокату або вальцевих труб з листового металу, а також для проектувальників прокатних і трубопрокатних станів [9].

За допомогою Ubeso PROFIL можливо швидко отримати діаграму напружень, яка показує, чи можливе виготовлення коритного профілю при зменшеній кількості робочих клітей. Важливо, щоб напруження не перевищували допустимі значення і не знаходилися в критичних зонах, щоб уникнути дефектів на виході з прокатного стану.

Ввівши в Ubeso PROFIL дані кожної клітей та матеріалу з якого виготовляється профіль була побудована квіткова діаграма коритного профілю (рис. 5) та діаграма напружень (рис. 6) - при 10 робочих клітях (а) та при 7 робочих клітях (б).

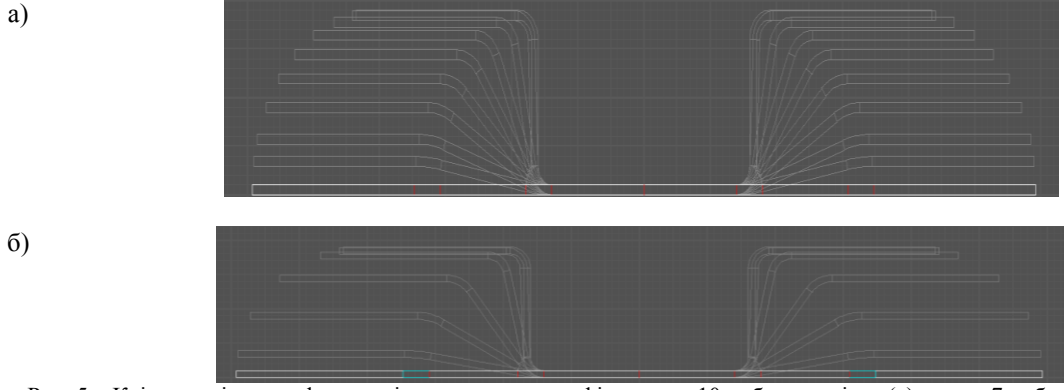


Рис. 5 – Квіткова діаграма формозміни коритного профілю - при 10 робочих клітях (а) та при 7 робочих клітях (б).

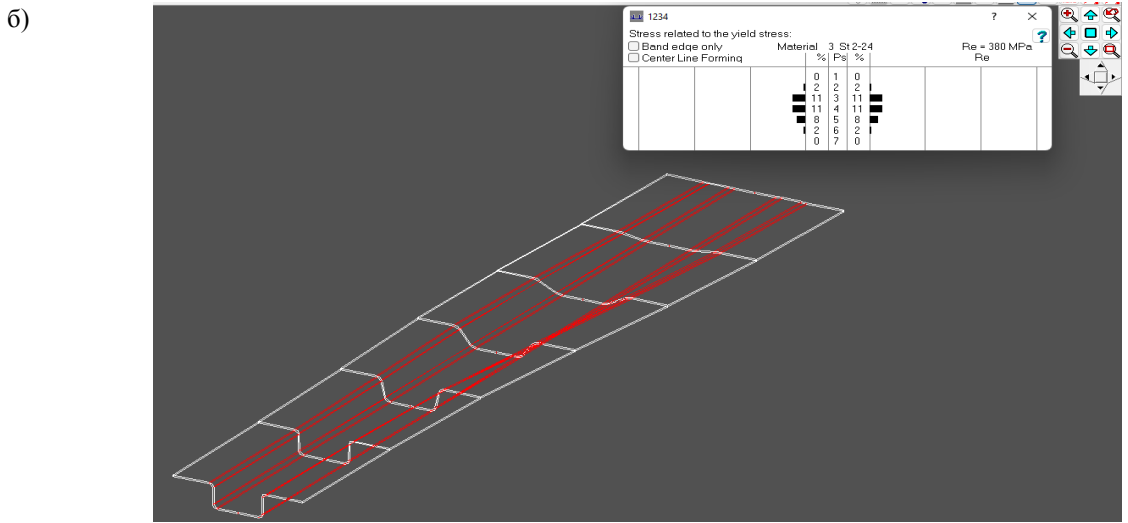
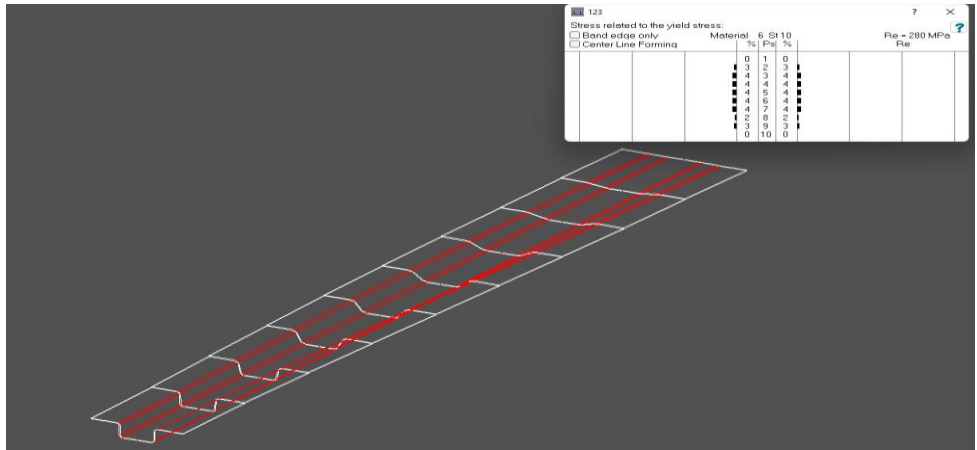


Рис. 6 – Діаграма напружень, МПа - при 10 робочих клітях (а) та при 7 робочих клітях (б).

Діаграми напружень, які були отримані для обох варіантів (10 (рис. 6а) та 7 (рис. 6б) робочих клітей), дозволили проаналізувати зміни і побачити, що напруження зросло, в середньому на 61 %. Максимальна точка напруження становить 47,6 МПа, що перебуває в межах допустимих значень. Це свідчить про те, що зменшення кількості робочих клітей не приводить до надмірного збільшення напружень і не впливає на якість кінцевого продукту.

Нами були створені 3D-моделі схем калібрування при 10 та 7 робочих клітях. Далі вони були імпортовані в QForm. Це програмне забезпечення є високопродуктивним інженерним програмним забезпеченням, яке використовується для моделювання, аналізу та оптимізації процесів обробки металу під впливом тиску. Воно забезпечене високим рівнем надійності і задовольняє потреби як великих, так і малих виробничих компаній, а також дослідницьких і навчальних закладів [10].

Для моделювання процесу виготовлення коритного профілю з використанням 10 та 7 робочих клітей були імпортовані 3D моделі робочих клітей у програму QForm і налаштовані необхідні параметри. Проведено дослідження напружено-деформованого стану заготовки, а також енергосилових параметрів процесу профілезгинання. При зменшенні кількості клітей з 10 до 7, спостерігаються зміни у напружено-деформованому стані заготовки та енергосилових параметрах процесу профілезгинання.

Значення середніх напружень (рис. 7) збільшилися на 19,5 % (за винятком першої неформуючої кліті), з

360 МПа (при 10 робочих клітках) до 430 МПа (при 7 робочих клітках).

Величина інтенсивності напружень (рис. 8) збільшилася на 2 %.

Силкові параметри зросли при зменшенні кількості клітей. На верхньому валку дія сили (див. рис. 9) зросла на максимумах з 0,24 МН до 0,25 МН, тобто на 4 %.

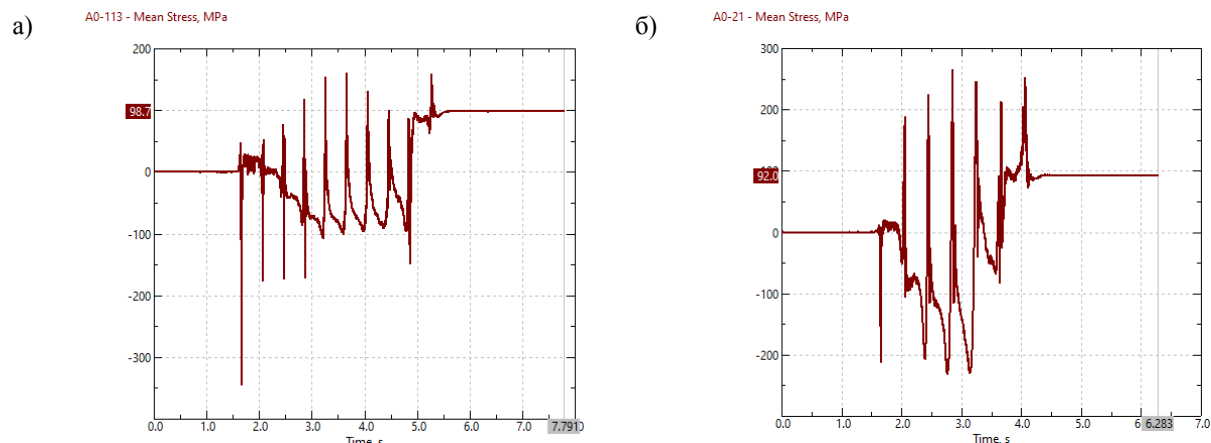


Рис. 7 – Графіки середніх напружень, МПа - при 10 робочих клітках (а) та при 7 робочих клітках (б)

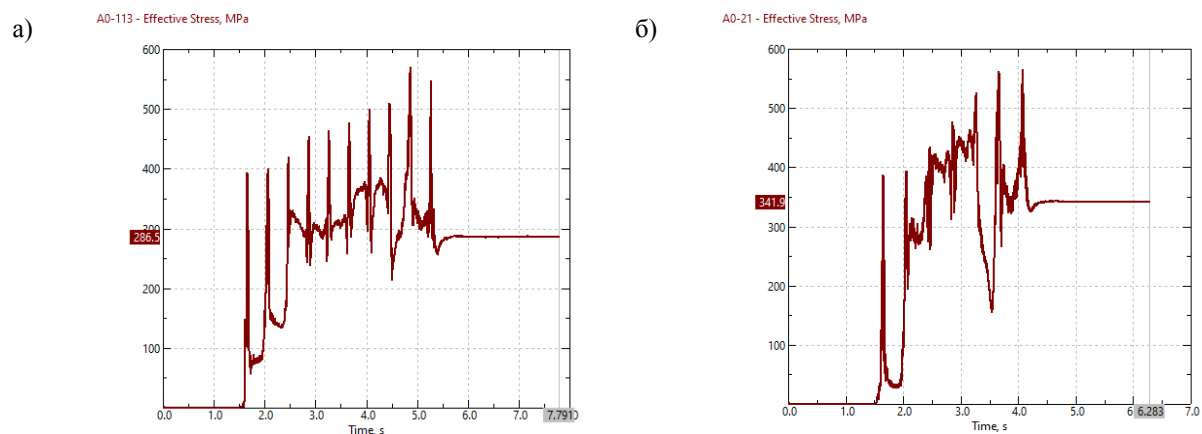


Рис. 8 – Графіки інтенсивності напружень, МПа - при 10 робочих клітках (а) та при 7 робочих клітках (б)

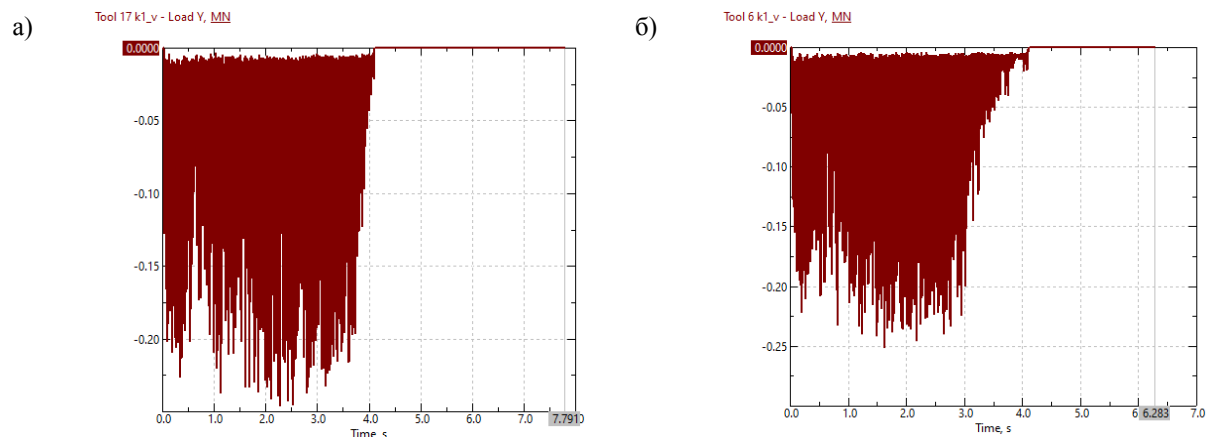


Рис. 9 – Графіки сили на валках, МН - при 10 робочих клітках (а) та при 7 робочих клітках (б)

**Висновки.** В даній роботі було розглянуто обґрунтований підхід до зменшення кількості переходів виробництва коритного профілю методом послідовного підгинання стінок виробу.

Були розглянуті формалізовані підходи, що використовуються для розрахунку кількості переходів при виробництві гнутих профілів. Було вказано, що загальноприйнятий підхід визначення кількості переходів, що базується на практичних напрацюваннях втратив свою актуальність.

Після обґрунтованого зменшення кількості клітей з 10 до 7 при виготовленні коритного профілю напружено-деформований стан заготовки змінився. Значення середніх напружень зросло на 19,5 %, а інтенсивність напружень зросла на 2 %. Силкові параметри також зросли, наприклад, величина дії сили на верхній валок на початку лінії профілювання зросла на 4 %. Але ці зміни не критичні та знаходяться в допустимих межах.

Провівши ряд розрахунків та моделювання технологічного процесу, а також провівши дослідження напружено-деформованого стану заготовки і енергосилових параметрів профілезгинального стану та

обравши оптимальний метод розрахунку профілю було встановлено, що розрахунки клітей для виготовлення профілю беруться з запасом та є можливість їх зменшити, це практично не вплине на кінцевий результат. Застосування розробленого підходу дозволяє зменшити матеріальні та енергетичні витрати на виробництво коритного профілю.

В подальшому планується розглянути вплив стійкості бокових стінок при виробництві коритного профілю на зменшення кількості технологічних переходів.

#### Список літератури:

31. Halmos T. Roll Forming Handbook / edited by George T. Halmos. Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583p.
32. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. vol. 88, no. 9–12, 2405–2415pp.
33. Сталеві холодноформовані тонкостінні конструкції [Текст]: монографія / В. О. Семко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2017. – 325 с.
34. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
35. Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів / В. Л. Чухліб, С. О. Губський, А. О. Окунь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2. – С. 169-173. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2020.2.16>.
36. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. SteelResearchInternational, 2021. vol. 89, no. 5.
37. Методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних робіт з курсів «Технології та обладнання для виробництва гнутих профілів» та «Виробництво гнутих профілів»: для студентів освітньої програми «Прикладна механіка» денної і заочної форми навчання / уклад. С. О. Губський, В. Л. Чухліб, А. О. Окунь, А. В. Ашкелянець, О. А. Юрченко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 40 с.
38. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / Тришевский И.С., Мирошниченко В. И., Стукалов В. П. // Киев: Техника, 1980. 168 с. Rollform Design Software. URL: <https://www.ubeco.com/profil.htm> (дата звернення: 01.06.2023).
39. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (дата звернення: 01.06.2023).

#### References (transliterated)

1. Halmos T. Roll Forming Handbook / edited by George T. Halmos. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 583p.
2. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. vol. 88, no. 9-12, 2405-2415pp.
3. Cold-formed steel thin-walled structures [Text]: monograph / V.O. Semko - Poltava: ASMI LLC, 2017. 325 p.
4. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
5. Formalized approaches to determining the number of technological transitions in the production of bent profiles / V. L. Chukhlib, S. O. Gubsky, A. O. Okun // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD: a collection of scientific papers - Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. № 2. - С. 169-173. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2020.2.16>.
6. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the help of steady state properties. SteelResearchInternational, 2021. vol. 89, no. 5.
7. Methodical instructions for laboratory and practical work in the courses "Technologies and equipment for the production of bent profiles" and "Production of bent profiles": for students of the educational program "Applied Mechanics" of full-time and part-time education / comp. S.O. Gubsky, V.L. Chukhlib, A.O. Okun, A.V. Ashkelyanets, O.A. Yurchenko - Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. 40 p.
8. Trishevskiy I.S. Calibration of rolls for the production of bent rolled profiles / Trishevskiy I.S., Miroshnychenko V.I., Stukalov V.P. 168 с.
9. Rollform Design Software. URL: <https://www.ubeco.com/profil.htm> (accessed June 01, 2023).
10. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (accessed June 01, 2023).

Поступила (received) 30.01.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Сасенко Олексій Федорович (Saienko Oleksii)** – студент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (050) 202-63-28; e-mail: [gta13042002@gmail.com](mailto:gta13042002@gmail.com).

**Губський Сергій Олександрович (Hubskey Serhii)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: [gubskiyso@gmail.com](mailto:gubskiyso@gmail.com).

**Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitaliy)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: [profdnepro@gmail.com](mailto:profdnepro@gmail.com).

**Сергієнко Микола Єгорович (Sergienko Nikolay)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-1924>; тел.: (050) 632-72-14; e-mail: [nesergienko@gmail.com](mailto:nesergienko@gmail.com)

**Колісник Костянтин Дмитрович (Kolisnyk Kostiantyn)** – магістр кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (068) 580-68-16.