МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.777.014.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/26

Саєнко О. Ф.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Чєркашин Д. В.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Губський С. О.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Чухліб В. Л.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВПЛИВ МІЖКЛІТЬОВОЇ ВІДСТАНІ НА ПРОЦЕС ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ КОРИТНОГО ПРОФІЛЮ

У статті досліджено вплив міжклітьової відстані на процес виготовлення коритного профілю методом валкового формування. В рамках дослідження використано програмне забезпечення QForm, що дозволило здійснити моделювання процесу та провести аналіз розподілу напружень при різних міжклітьових відстанях (400 мм, 500 мм, 600 мм, 800 мм, 1000 мм). Результати моделювання показали, що поступове збільшення міжклітьової відстані від 400 мм до 1000 мм сприяє рівномірному розподілу деформації, зменшенню пікових напружень і покращенню геометричної точності готового виробу. Встановлено, що занадто мала міжклітьова відстань призводить до накопичення залишкових напружень і можливих дефектів, тоді як надмірно велика відстань потребує необґрунтовано збільшених енергосилових витрат. Оптимальний підхід передбачає поступове збільшення відстані між клітями, що дозволяє рівномірно перерозподілити напруження на всіх етапах формування профілю. Окрім моделювання, у статті розглянуто теоретичні основи процесу валкового формування та проаналізовано технологічні особливості виробництва гнутих профілів. Особливу увагу приділено питанням точності геометричних параметрів профілю, рівномірності розподілу деформації, енергозатрат процесу та впливу міжклітьової відстані на міцність обладнання. Запропоновані рекомендації щодо вибору міжклітьової відстані можуть бути використані для підвищення ефективності промислових процесів валкового формування. Визначена оптимальна схема з варіативною міжклітьовою відстанню дозволяє досягти найкращого балансу між якістю профілю, ресурсозбереженням і довговічністю обладнання. Дослідження підтверджують, що правильний вибір міжклітьової відстані сприяє зниженню залишкових напружень у матеріалі, що є важливим фактором для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності виробу.

Ключові слова: *коритний профіль, міжклітьова відстань, валково-формуючий верстат, моделювання, інтенсивні напруження, геометрична точність, технологічний процес, залишкові напруження, QForm, профілювання, деформація.*

Постановка проблеми. Вибір оптимальної міжклітьової відстані у валковому формуванні є важливим технологічним завданням, оскільки вона впливає на якість профілю, рівномірність деформації та довговічність обладнання. Надто мала відстань призводить до накопичення напружень і появи дефектів, тоді як надмірно велика – до нестабільності процесу та зростання енергозатрат

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В нинішніх умовах ринку якість та вартість виготовлення продукції є ключовими факторами для конкурентоспроможності та успішного розвитку бізнесу. Це стосується всієї продукції на ринку, однак у даній статті зосереджено увагу на підході до підвищення якості виготовлення гнутих профілів шляхом визначення оптимальної міжклітьової відстані [1].

Гнуті профілі виготовленні валковим формуванням є ключовим елементом у будівництві промислових конструкцій. Завдяки своїй унікальній формі вони забезпечують високу стійкість до навантажень, що робить їх незамінними для створення каркасів, підсилення стін, перекриттів і реалізації різноманітних інженерних рішень. Така універсальність і міцність роблять профілі важливим компонентом масштабних промислових і будівельних проектів [2].

Для досягнення високої якості профілів необхідно ретельно контролювати параметри технологічного процесу, зокрема міжклітьову відстань під час профілювання. Недостатньо оптимізовані параметри можуть призвести до виникнення дефектів, таких як хвилястість граней, нерівномірний розподіл напружень та зниження механічних характеристик готової продукції [3].

Оптимізація міжклітьової відстані дозволяє покращити якість геометрії профілю, зменшити внутрішні напруження в металі та підвищити ефективність виробничого процесу. Це сприяє зниженню матеріальних витрат, підвищенню продуктивності та забезпеченню стабільності параметрів продукції відповідно до вимог нормативних документів [4].

Постановка завдання. Метою статті є визначення оптимальної міжклітьової відстані у процесі валкового формування коритного профілю для забезпечення високої якості готового виробу, зменшення дефектів і залишкових напружень, а також підвищення стабільності технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу. 1. Теоретичні основи виготовлення профілів.

Виробництво гнутих профілів методом валкового формування має значні переваги над іншими способами виготовлення профілів, що зумовлює його високий попит у промисловості [5].

Гнуті профілі отримують поступовим холодним гнуттям стального листа чи стрічки. У будівництві вони використовуються як швелери, таврові деталі й елементи огороджувальних конструкцій [2, 6, 7].

До основних переваг виробництва гнутих профілів методом валкового формування належать:

– універсальність форм та матеріалів: можливість виготовлення профілів будь-якої конфігурації поперечного перерізу з різними розмірами ширини, товщини та довжини. Для виробництва можуть використовуватись штаби зі сталі різних марок, кольорових металів і сплавів;

– інтеграція допоміжних операцій: процес формування профілів дозволяє виконувати супутні операції, такі як перфорація, зварювання, нанесення покриттів і фарбування, що спрощує виробництво та скорочує витрати;

– висока якість поверхні: забезпечується гладкість і точність профілю, що контролюється на кожному етапі формування;

– точність і жорсткість: профілі виготовляються з високою точністю, що дозволяє зменшити відхилення розмірів і підвищити жорсткість готового виробу;

– простота та компактність обладнання: профілезгинальні стани характеризуються невеликими габаритами, низькою масою та відносною простотою конструкції;

– енергоефективність та стабільність: процес гнуття потребує мінімальної витрати енергії, забезпечуючи високу стійкість валків і стабільність технологічного процесу [8];

– економія матеріалів: коефіцієнт використання металу сягає 99,5 %, що забезпечує низькі втрати матеріалу;

– завершеність виробів: у багатьох випадках гнуті профілі не потребують додаткової обробки, що знижує витрати на виробництво [9].

На (рис. 1) представлено різновиди гнутих профілів прокату:

а) рівнобокі, нерівнобокі кути, а також кути з підігнутими полками;

б) рівнополичні та нерівнополичні швелери;

в) зетові профілі;

г) коробчаті профілі;

д) С-подібні (напівзамкнені) профілі, звичайні й з гофрами на основі;

е) замкнуті профілі квадратного та прямокутного перерізу (звичайні й зварні – зі звареними кромками);

ж) коритні профілі рівнополичні та нерівнополичні;

з) гофровані листи із трапецієподібними й круглими гофрами [10].

Процес гнуття є перспективним завдяки можливості безперервної роботи обладнання, інтеграції додаткових функцій (зварювання стиків руло-

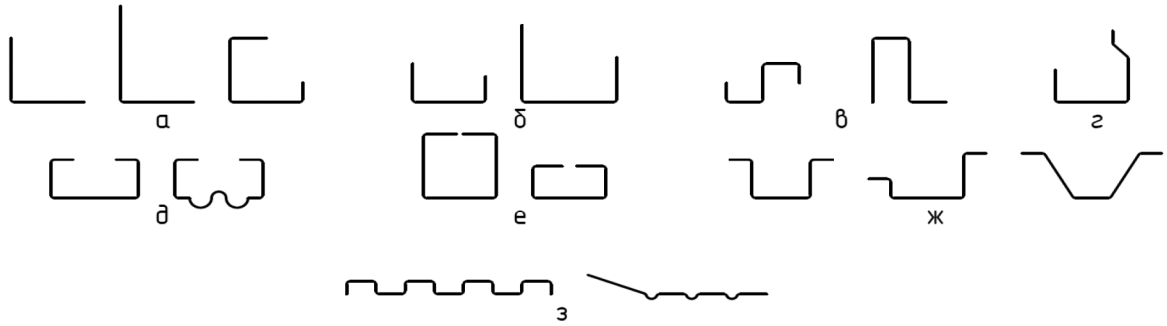

Рис. 1. Види гнутих профілів прокату

нів) і простоті калібрування валків. Готові профілі можуть бути відрізані, змащені, запаковані та підготовлені до транспортування без додаткових операцій [11].

Міжклітьова відстань у профілезгинальних станах має суттєвий вплив на якість готового профілю, стабільність технологічного процесу, а також на енергоємність та ефективність виробництва. Основні аспекти впливу міжклітьової відстані включають:

1. Точність геометричних параметрів профілю:

– надмірна міжклітьова відстань може спричинити деформацію металу між клітями через пруженіння матеріалу. Це призводить до відхилень від заданої геометрії профілю;

– занадто мала відстань, у свою чергу, може викликати накопичення напруги у матеріалі, що також погіршує точність і може призвести до дефектів.

2. Рівномірність розподілу деформації:

– при оптимальній міжклітьовій відстані деформація розподіляється рівномірно по всій довжині профілю;

– неправильний вибір міжклітьової відстані може викликати надмірну концентрацію напруг в окремих зонах, що збільшує ймовірність виникнення тріщин або інших дефектів.

3. Вплив на міцність обладнання:

– збільшення міжклітьової відстані знижує навантаження на окремі кліті, сприяючи більш тривалій роботі валків та інших компонентів стану, але енергетичні витрати зростають;

4. Енергозатрати процесу:

– оптимальна міжклітьова відстань дозволяє зменшити зусилля, необхідні для профілювання, знижуючи загальну енергоємність процесу;

– у випадках неправильно підібраної відстані можуть зростати втрати енергії через підвищене тертя та неефективність деформування;

5. Якість поверхні профілю:

– при надмірному зменшенні міжклітьової відстані можливе порушення стабільності прокатки, що призводить до утворення хвилястостей, подряпин або інших дефектів поверхні.

6. Продуктивність процесу:

– зменшення міжклітьової відстані зазвичай дозволяє збільшити швидкість профілювання, але лише до певної межі, за якої можуть виникати проблеми із точністю та якістю [12, 13].

Отже, процес виготовлення гнутого профілю валковим формуванням є складним технологічним процесом і потребує високої точності на всіх етапах виробництва. Одним із ключових параметрів, який впливає на якість готового виробу, є міжклітьова відстань. Її оптимальне значення відіграє важливу роль у забезпеченні необхідної форми, точності розмірів та стабільності процесу виготовлення.

Правильний вибір міжклітьової відстані дозволяє уникнути деформацій, забезпечити точність готового виробу та зменшити знос обладнання. На визначення цього параметра впливають такі чинники, як товщина і ширина сталевої смуги, марка сталі, форма поперечного перерізу профілю та запланований обсяг виробництва. Оптимальна відстань між валками сприяє зниженню тертя, мінімізує знос валків і забезпечує рівномірність формування профілю.

2. Експериментальна частина.

У рамках дослідження було виконано моделювання процесу виготовлення коритного профілю з розмірами 34 × 19 × 27,5 × 2 мм. (рис. 2). на валково-формуючому верстаті. Процес формування профілю здійснювався поетапно із кутами підгинання на кожній кліті 10°, 18°, 30°, 42°, 54°, 66°, 78°, 88° та завершальний етап під кутом 90° (рис. 3). Для моделювання використовувалася сталь марки Ст10, яка має низький вміст вуглецю та характеризується високими пластичними властивостями, що дозволяє уникнути тріщин і деформацій при профілюванні. Основною метою моде-

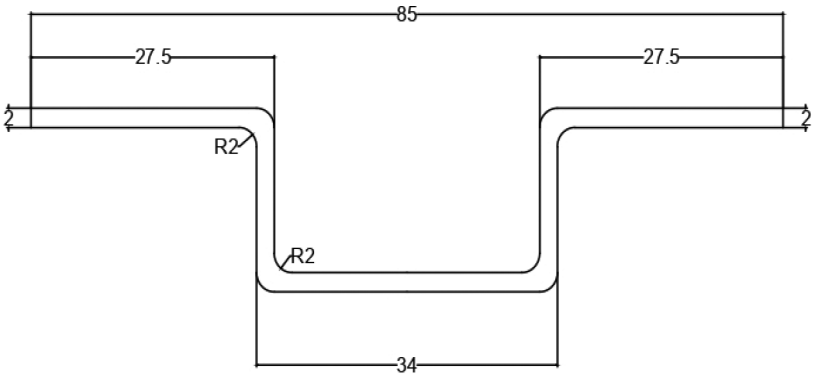

Рис. 2. Геометричні параметри коритного профіля

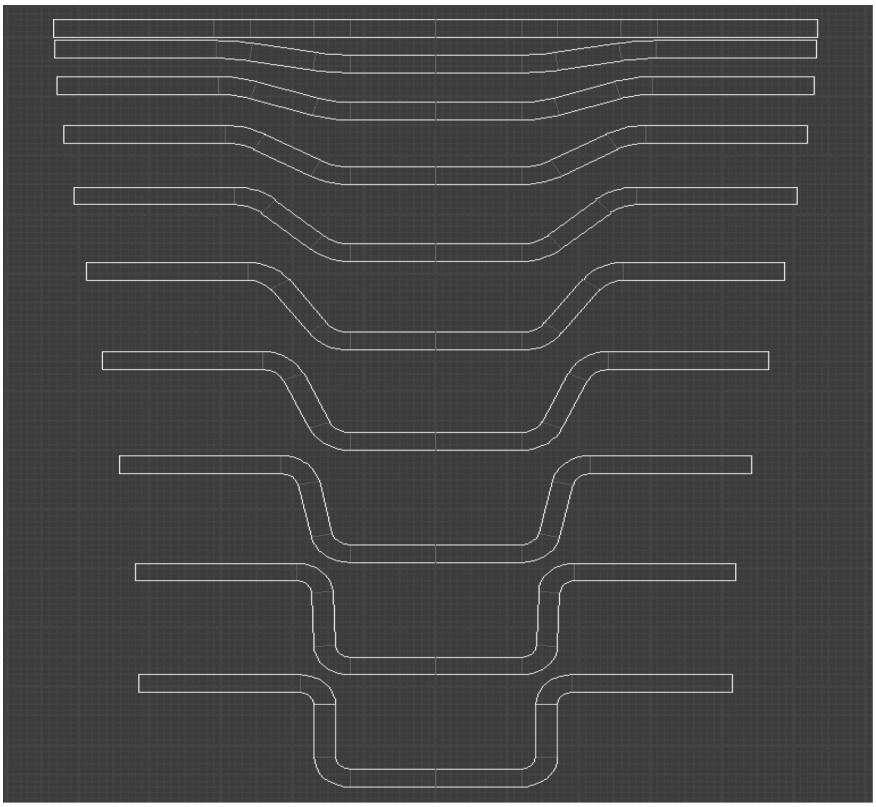

Рис. 3. Квіткова діаграма

лювання було визначення впливу міжклітьової відстані на якість кінцевого виробу.

Спосіб виготовлення гнутого коритоподібного профілю передбачає прикладання нормальних зусиль до ділянок вертикальних полиць поблизу зони згину після завершального проходу. На попередніх етапах заготовка центрується горизонтальними зусиллями, після чого виконується обтиснення дна профілю для покращення його геометричних характеристик (рис. 4) [14].

Для аналізу впливу міжклітьової відстані на процес виготовлення коритного профілю було використано програмне забезпечення QForm. В моделі технологічного процесу враховувалися різні варіанти міжклітьової відстані (400 мм,

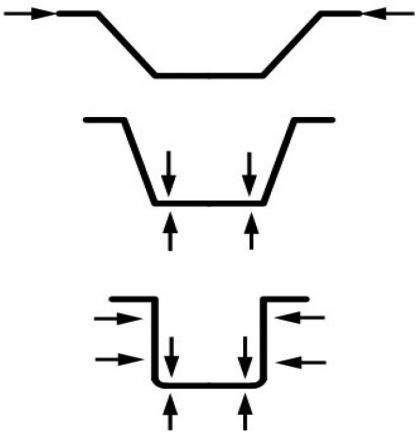

Рис. 4. Спосіб виготовлення гнутого коритоподібного профілю

500 мм, 600 мм, 800 мм та 1000 мм), які було досліджено з точки зору напружено-деформованого стану матеріалу (рис. 5).

QForm UK – це професійне інженерне програмне забезпечення, яке використовується для моделювання, аналізу та оптимізації процесів обробки металу тиском, що забезпечує чудову надійність. Він покриває основні потреби в моделюванні обробки металу тиском для великих і малих виробничих компаній, а також дослідницьких і навчальних закладів [15].

Під час аналізу графіків інтенсивності напружень для різних міжклітьових відстаней (400 мм, 500 мм, 600 мм, 800 мм, 1000 мм та комбінації 400–1000 мм) було виявлено такі особливості:

Графік із міжклітьовою відстанню 400 мм. (рис. 6):

– напруження характеризуються різкими перепадами на початкових етапах, що свідчить про високий рівень деформації матеріалу;

– максимальне напруження сягає близько 500 МПа на початку процесу, але після декількох етапів стабілізується на рівні 200–300 МПа;

– така схема є ефективною для початкових етапів, але на фінальних етапах виникає нерівномірність напружень.

Графік із міжклітьовою відстанню 500 мм (рис. 7):

– загальна структура графіка схожа до попереднього варіанту, але напруження знижуються дещо швидше;

– максимальні піки досягають 450–500 МПа, а стабілізація відбувається на рівні 200 МПа;

– міжклітьова відстань 500 мм є більш прийнятною для зменшення інтенсивності пікових напружень.

Графік із міжклітьовою відстанню 600 мм. (рис. 8):

– різкі піки напружень на початкових етапах дещо згладжені, але їх амплітуда залишається високою (400–450 МПа);

– стабілізація відбувається після 4-го етапу, напруження поступово знижуються до 150–200 МПа;

– при цій міжклітьвій відстані є краща рівномірність напружень на середніх етапах, але вимагає додаткової уваги на початкових етапах.

Графік із міжклітьовою відстанню 800 мм (рис. 9):

– напруження характеризуються меншими піками на початкових етапах (350–400 МПа), але є помітні коливання в середині процесу;

– стабілізація напружень відбувається після 6-го етапу, де вони знижуються до рівня 100–150 МПа;

– така схема є ефективною на пізніх етапах, проте виникає ризик нерівномірності напружень у середній зоні.

Графік із міжклітьовою відстанню 1000 мм (рис. 10):

– пікові напруження значно нижчі на початку процесу (300–350 МПа), але графік має значні коливання протягом усього циклу;

– стабілізація напружень відбувається лише на фінальних етапах, де вони знижуються до 100 МПа;

– велика міжклітьова відстань ефективна для мінімізації напружень, але викликає значні перепади на ранніх етапах.

Графік із міжклітьовою відстанню від 400 до 1000 мм (рис. 11). Така схема дозволяє рівномірніше розподілити напруження на всіх етапах

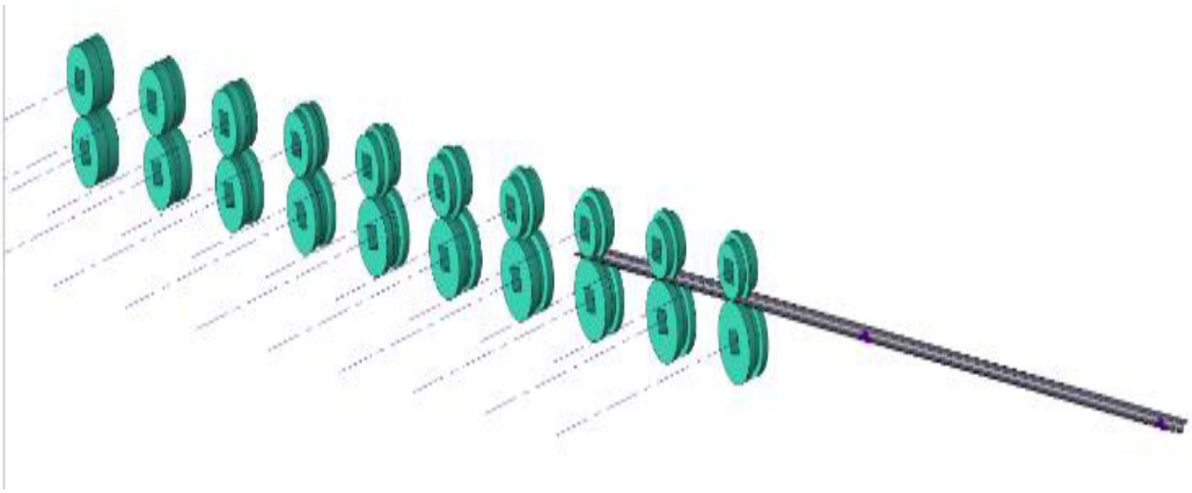

Рис. 5. Технологічний процес виготовлення коритного профіля

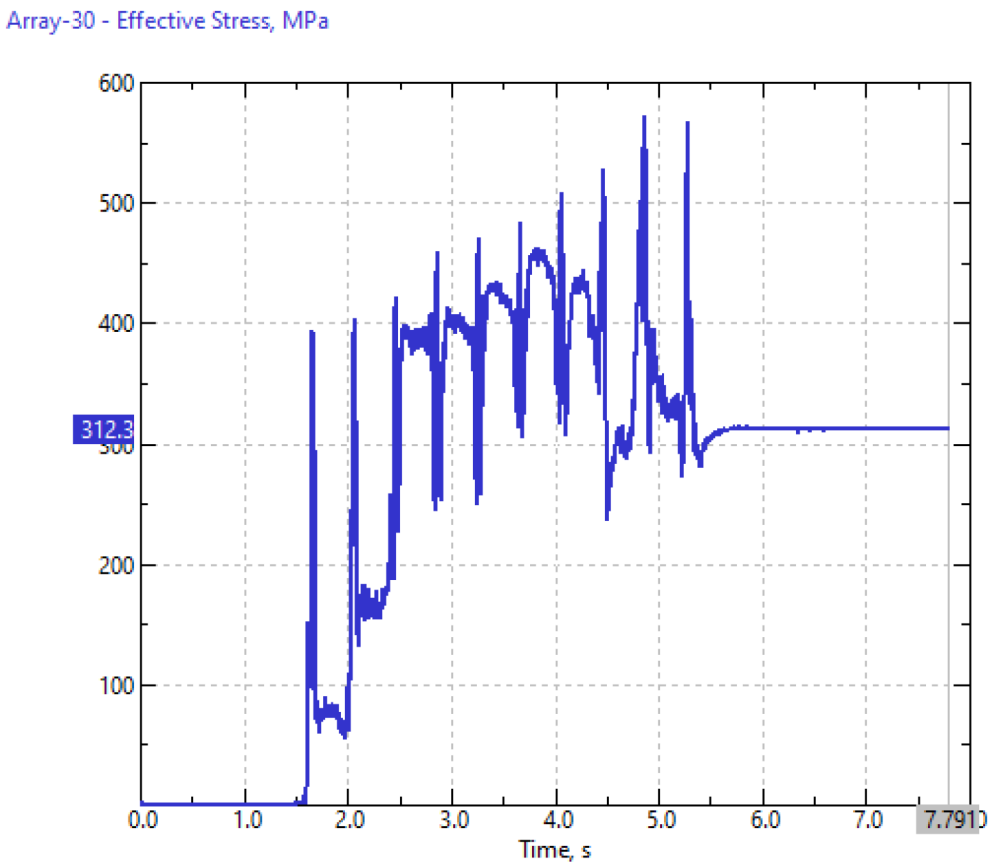

Рис. 6. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань 400 мм

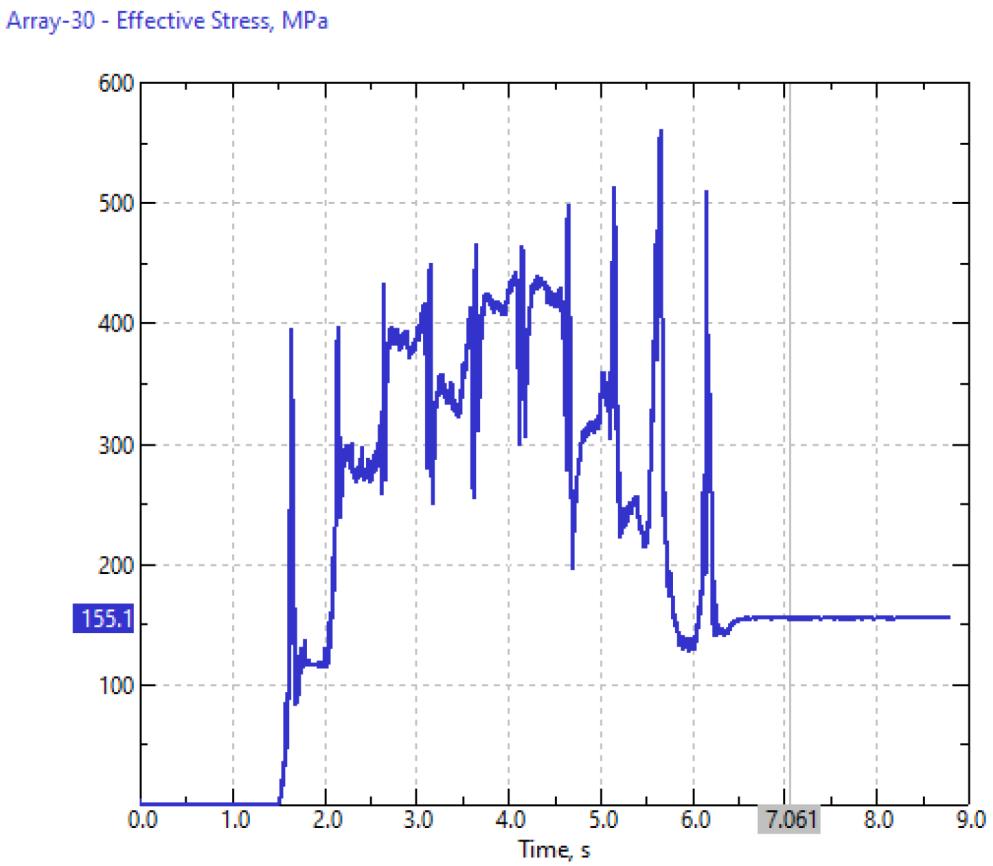

Рис. 7. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань 500 мм

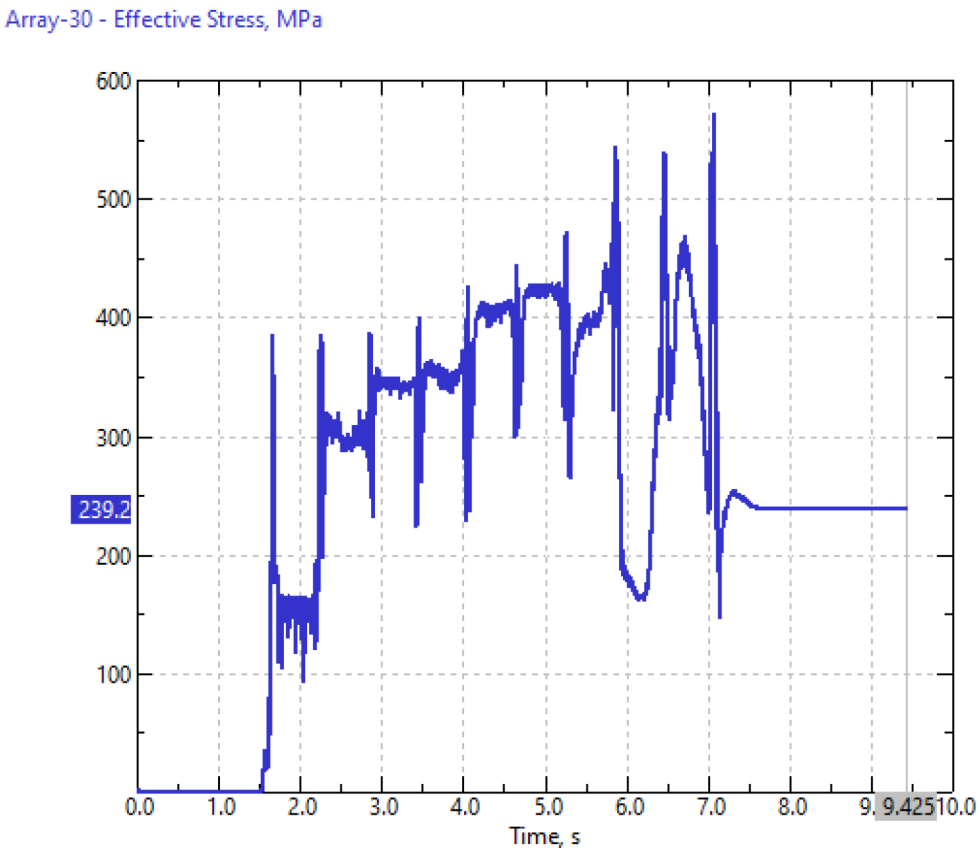

Рис. 8. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова 600 мм

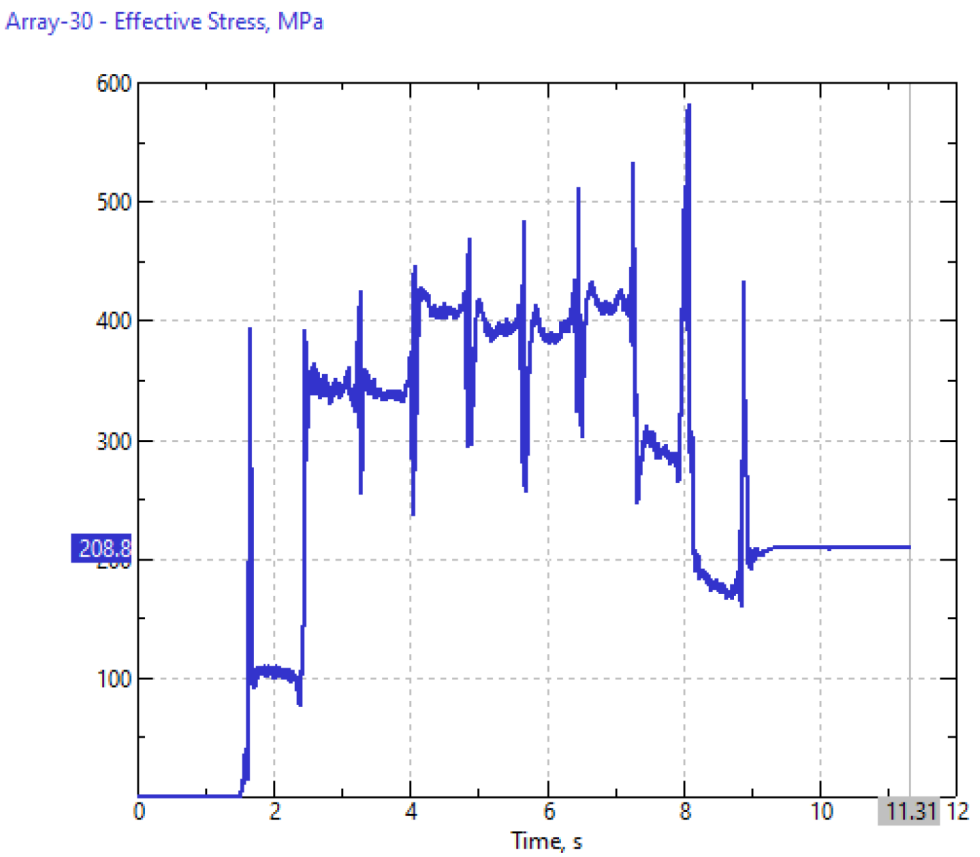

Рис. 9. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань 800 мм

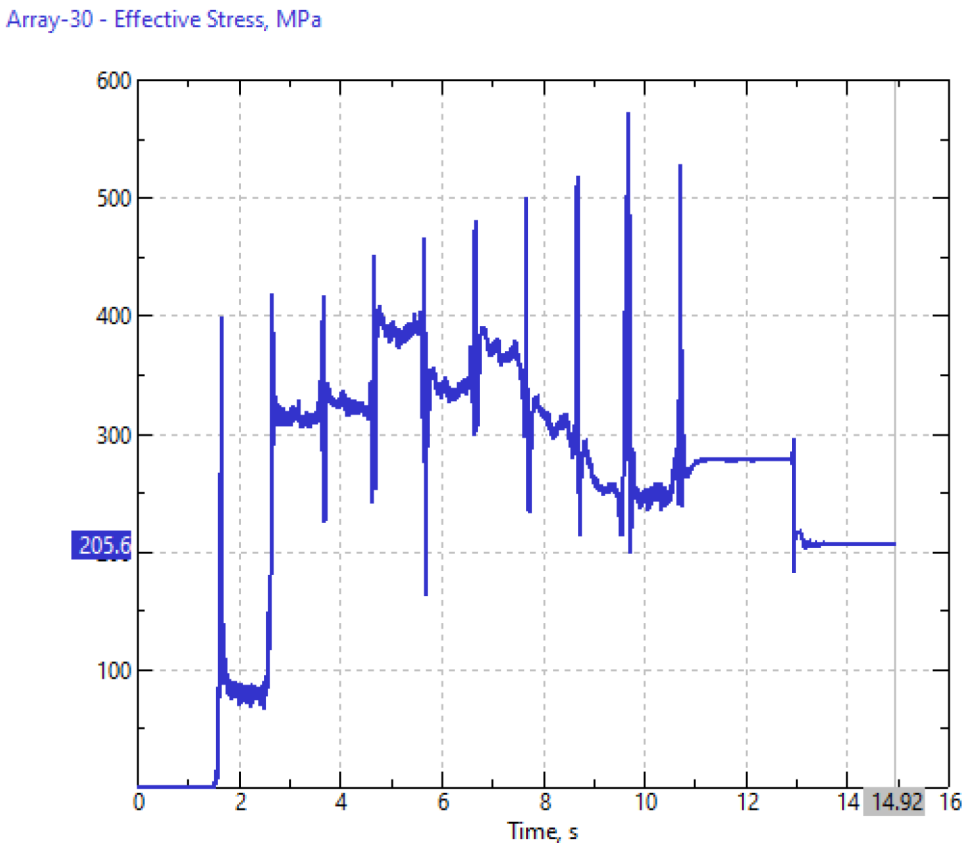

Рис. 10. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова 1000 мм

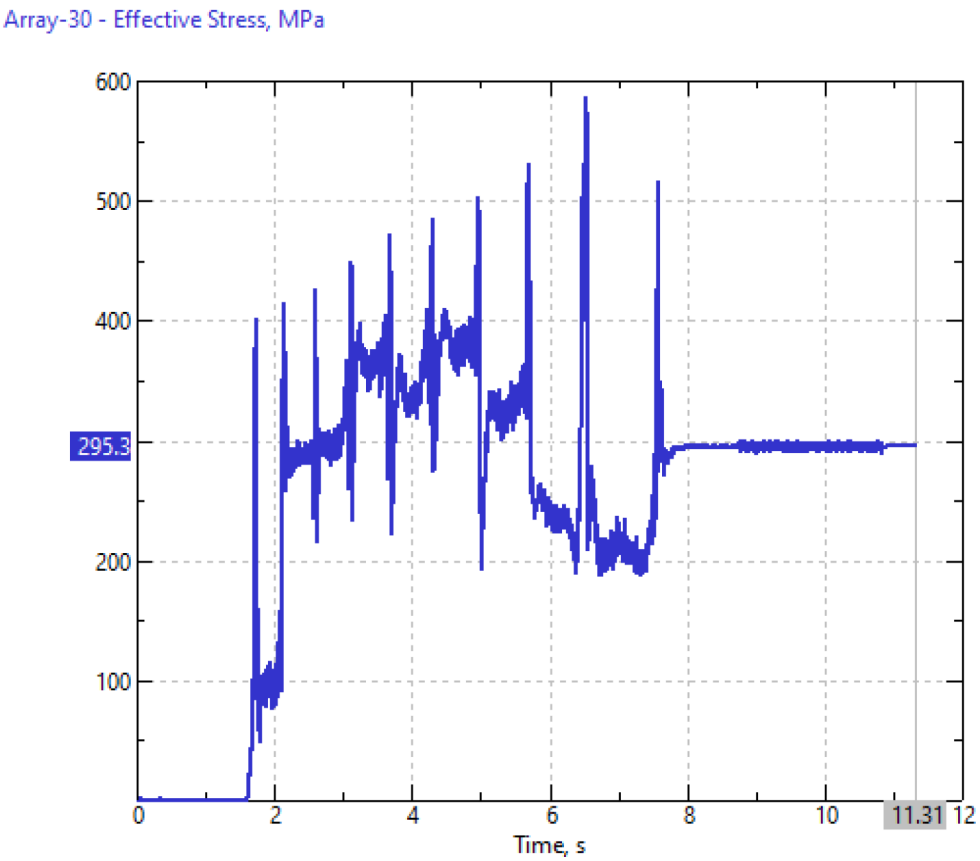

Рис. 11. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань від 400 до 1000 мм

формування профілю. Детально міжклітьова відстань була така: перша кліть – 400 мм, друга кліть – 450 мм, третя кліть – 500 мм, четверта кліть – 550 мм, п'ята кліть – 600 мм, шоста кліть – 650 мм, сьома кліть – 700 мм, восьма кліть – 800 мм, дев'ята кліть – 1000 мм. Графік із зростаючою міжклітьовою відстанню демонструє найбільш збалансовану структуру напружень (рис. 11):

– максимальні напруження сягають 450 МПа на початку процесу, але їх амплітуда поступово зменшується до 150–200 МПа на середніх та фінальних етапах;

– рівномірність напружень значно покращується порівняно з варіантами із фіксованими відстанями;

– найкращий баланс досягається завдяки поступовому збільшенню міжклітьових відстаней.

Висновки. В результаті проведеного моделювання процесу виготовлення коритного профілю в програмному забезпеченні QForm було проаналізовано вплив міжклітьової відстані на розподіл інтенсивних напружень під час деформації. Проведені дослідження показали, що застосування фіксованих міжклітьових відстаней (400 мм, 500 мм, 600 мм, 800 мм, 1000 мм) не забезпечує рівномірного розподілу напружень на всіх етапах обробки профілю. Це призводить до виникнення різких пікових значень на окремих етапах процесу, що може негативно впливати на якість готового виробу.

Оптимізована схема з поступовим збільшенням міжклітьових відстаней (від 400 мм до 1000 мм) дозволяє досягти збалансованого розподілу напружень. Результати моделювання показали, що максимальні напруження при використанні зростаючої міжклітьової відстанні зменшуються, а їх стабілізація відбувається швидше, що сприяє покращенню умов формування профілю. Така схема мінімізує пікові напруження на початкових етапах процесу та забезпечує їх рівномірність на середніх і фінальних етапах.

Таким чином, для забезпечення найкращих умов деформації коритного профілю та підвищення його геометричної точності рекомендовано використовувати поступове збільшення міжклітьових відстаней між валками. Це сприяє зниженню залишкових напружень у матеріалі та покращує якість кінцевого продукту.

Список літератури:

1. Kang, C.; Sun, B.; Zhang, X.; Yao, C. Research on the Mechanism and Processability of Roll Forming. *Materials* 2024, 17(13), 3126, pp. 1–20.

2. Jing, Y.; Sun, Q.; Zhao, Y. Design of Z Profile Roller Tooling and Research on Roller Clearance. *Machines* 2023, 11(7), 767, pp. 1–19.

3. Liang, J.; Chen, C.; Liang, C.; Li, Y.; Chen, G.; Li, X.; Wang, A. One-Time Roll-Forming Technology for High-Strength Steel Profiles with "日" Section. *Advances in Materials Science and Engineering 2019*, 2019, 6505914, pp. 1–10.

4. Marini D, Cunningham D, Corney JR. Near net shape manufacturing of metal: a review of approaches and their evolutions. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture*. 2018; 232(4): 650–669.

5. Юрченко О. А. Розробка, дослідження та впровадження технології валкового формування гнутих профілів з просічно-витяжними елементами : автореф. дис.... канд. техн. наук: Процеси та машини обробки тиском / *Держ. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»*. –Харків, 2000.

6. Проценко В. М., Бєлоконь Ю. О. Технологія виготовлення гнутих профілів : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 136 «Металургія» освітніх-професійних програм «Обробка металів тиском». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 104 с.

7. Бадюк С. І. Розвиток методів розрахунку технологічних параметрів виробництва якісного прокату на ливарно-прокатних комплексах : дис. ... канд. техн. наук: Процеси і машини обробки тиском / *Нац. акад. наук України, Ін-т чорної металургії ім. З. І. Некрасова*. – Дніпро, 2019.

8. Fu X, Wang B, Zhu X, et al. Numerical and experimental investigations on large-diameter gear rolling with local induction heating process. *Int J Adv Manuf Tech* 2016; 91: pp. 1–11.

9. Gan, W.; Wagoner, R. H.; Mao, K.; Price, S.; Rasouli, F. Practical Methods for the Design of Sheet Formed Components. *J. Eng. Mater. Technol*. 2004, 126, 360–367.

10. Б. П. Середа, В. М. Проценко Виготовлення спеціальних видів прокату: Навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 7.090404 «Обробка металів тиском» / Б. П. Середа, В. М. Проценко. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 88 с.

11. Otzurk, F.; Dilmec, M.; Turkoz, M.; Ece, R.E.; Halkaci, H.S. Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability. *In Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Aydin, Turkey*, 18–21 June 2009.

12. Miranda, S.S.; Barbosa, M.R.; Santos, A.D.; Pacheco, J.B.; Amaral, R.L. Forming and springback prediction in press brake air bending combining finite element analysis and neural networks. *J. Strain Anal. Eng. Des*. 2018, 53, 584–601.

13. Benabdallah, H.S. Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions. *Tribol. Int*. 2007, 40, 64–73.

14. Li Y.G., Sun Y., Huang H.L., Li D.Y., Ding S.C. Finite Element Simulation of Chain-Die Forming U Profiles with Variable Cross-Section. *Mater. Sci. Forum*. 2017.

Sayenko O.F., Cherkashin D.V., Hubskyi S.O., Chukhlib V.L. INFLUENCE OF THE INTER-CAGE DISTANCE ON THE ROLL-FORMING PROCESS OF A TRAY PROFILE

The article investigates the effect of the interstand distance on the roll forming process of a channel profile. The study utilizes QForm software, enabling process simulation and stress distribution analysis at different interstand distances (400 mm, 500 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm). Simulation results indicate that a gradual increase in interstand distance from 400 mm to 1000 mm promotes uniform deformation distribution, reduces peak stresses, and improves the geometric accuracy of the final product. It has been established that an excessively small interstand distance leads to the accumulation of residual stresses and potential defects, while an excessively large distance requires unjustifiably high energy and force expenditures. The optimal approach involves a gradual increase in interstand distance, allowing for an even redistribution of stresses at all stages of profile formation. In addition to simulation, the article examines the theoretical foundations of the roll forming process and analyzes the technological features of bent profile manufacturing. Particular attention is paid to the accuracy of geometric parameters, uniformity of deformation distribution, energy consumption of the process, and the impact of interstand distance on equipment durability. The proposed recommendations for selecting the interstand distance can be used to enhance the efficiency of industrial roll forming processes. The identified optimal scheme with a variable interstand distance ensures the best balance between profile quality, resource efficiency, and equipment longevity. The findings confirm that the correct choice of interstand distance contributes to reducing residual stresses in the material, which is a crucial factor in ensuring product durability and operational reliability.

Key words: *channel profile, interstand distance, roll forming machine, simulation, intensive stresses, geometric accuracy, technological process, residual stresses, QForm, profiling, deformation.*