

Ю. В. БАБАЙ, С. О. ГУБСЬКИЙ

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ 3D ТИПУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ

У роботі проведено аналіз сучасних технологій валкового формування 3D-гнутих профілів та їх застосування в автомобілебудуванні, будівництві, промисловості, сільському господарстві. Розглянуто підходи до оптимізації кількості технологічних переходів, що сприяє зниженню часу виробництва та підвищенню продуктивності. Особливу увагу приділено контролю напружено-деформованого стану металу, який є ключовим для забезпечення високої якості виробів. Оцінено вплив сенсорних технологій на моніторинг процесу в реальному часі, що дозволяє зменшити дефекти та виробничі витрати. Використання передових рішень у валковому формуванні відкриває нові можливості для оптимізації виробництва.

Ключові слова: валкове формування, гнуті профілі, 3D технології, технологічні переходи, контроль якості.

Y. BABAY, S. HUBSKYI

MODERN TECHNOLOGIES OF ROLL FORMING FOR 3D-BENT PROFILES AND THEIR APPLICATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

The paper provides an analyzes modern technologies of roll forming for 3D-bent profiles and their applications in the automotive industry, construction, manufacturing, and agriculture. Approaches to optimizing the number of technological transitions are considered, contributing to reduced production time and increased productivity. Special attention is given to controlling the stress-strain state of the metal, which is crucial for ensuring high product quality. The impact of sensor technologies on real-time process monitoring is assessed, allowing for defect reduction and lower production costs. The use of advanced solutions in roll forming opens new opportunities for production optimization.

Key words: roll forming, bent profiles, 3D technologies, technological transitions, quality control.

Вступ.

Технологія 3D валкового формування гнутих профілів є важливим напрямом сучасного машинобудування та виробництва. Вона дозволяє створювати профілі зі змінною геометрією, які є критично необхідними для різних галузей, зокрема автомобілебудування, будівництва, авіакосмічної промисловості, де вагові характеристики та міцність профілів відіграють вирішальну роль. Використання методів 3D формування сприяє зниженню виробничих витрат та підвищенню якості продукції завдяки оптимізації процесів деформації, застосуванню високоточного обладнання, сенсорних систем та автоматизації на основі роботизованих комплексів.

Водночас, розробка технології валкового формування профілів зі змінним перерізом супроводжується численними технічними викликами, такими як виникнення залишкових напружень, деформацій та ризик втрати стійкості профілю під час процесу формування. Це спонукає до впровадження складних методів моделювання та новітніх підходів, таких як метод кінцевих елементів, які дозволяють прогнозувати виникнення технологічних та експлуатаційних дефектів і підбирати оптимальні параметри для уникнення помилок.

Мета та постановка задачі.

Метою даної статті є систематизація та аналіз сучасних досліджень у галузі 3D валкового формування гнутих профілів, зокрема робіт, присвячених моделюванню технологічного процесу, оптимізації параметрів технологічних переходів та використанню новітніх технологій для підвищення якості профілів.

Одним із сучасних напрямків дослідження є вивчення оптимізації процесів виробництва гнутих профілів. У роботі [1] підкреслюється значення обґрунтованого вибору кількості переходів у виробництві складних гнутих профілів. Зазначено, що неправильний вибір кількості переходів може призвести до зниження міцності профілю та його деформації, що негативно впливає на загальну стійкість конструкцій. Для вибору кількості переходів

пропонується використання комбінованого підходу, що включає аналітичні розрахунки та експериментальні випробування, для точного визначення оптимальної кількості переходів. Цей підхід дозволяє забезпечити високу якість гнутих профілів і відповідність їх технічним та технологічним вимогам, знижуючи при цьому ризик виникнення дефектів у процесі виробництва, так як гнуті профілі використовуються в різних галузях промисловості, таких як будівництво, автомобільна і залізнична промисловість для виготовлення структурних та безпекових елементів з надміцних сталей [2]. Виробництво гнутих профілів з високоміцних металів є важливим напрямом у автомобілебудівній галузі, оскільки воно застосовується для виготовлення силових елементів кузову.

Також, важливою темою досліджень є контроль напружено-деформованого стану під час формування профілів з повздовжніми гофрами. У праці [3] зазначається, що значні напруження виникають у критичних зонах профілів, що мають високі кути підгинання, зокрема понад 66° . Залишкові напруження можуть призводити до деформацій, які погіршують механічні властивості профілю та знижують його стійкість до навантажень у реальних умовах експлуатації. Для запобігання утворенню дефектів запропоновано вдосконалити контроль та регулювання напружень у процесі формування. Цей підхід дозволяє мінімізувати ризик утворення деформацій, підвищуючи тим самим експлуатаційні характеристики продукції. Крім того, сучасні дослідження вказують на важливість точного налаштування параметрів процесу, що дозволяє зменшити частоту дефектів та підвищити ефективність виробництва. В роботі [4] вказано, що контроль деформацій можна ефективно відстежувати шляхом симуляції процесу за допомогою програмного забезпечення *Copra FEA*. В статті [5] описується що такі дефекти як надмірне пружиніння та тріщини під час процесу 3D валкового формування залежать від кількості багатоточкових матриць та попереднього розтягування заготовки. Для кращої оцінки деформації пружиніння, пропонується розділяти пружиніння при горизонтальному та вертикальному згинанні [6].

В дослідженнях [7] розглядається процес 3D валкового формування, розроблений компанією ORTIC, який дозволяє виробляти металеві панелі зі змінним поперечним перерізом та змінною довжиною кривизни. Технологія знайшла застосування в будівельній промисловості та автомобільній галузі завдяки своїй гнучкості та можливості виробництва компонентів з високоміцних сталей. Ця технологія використовує удосконалений систему керування, включаючи шестикоординатні роботи, тримачі заготовок, інтелектуальні датчики та інші ключові елементи. Крім того, ця нова технологія відповідає вимогам індустрії 4.0, оскільки забезпечує можливість машинного навчання для інтелектуальної модернізації виробництва [8]. Впровадження 3D гнучкого валкового формування вирішує багато проблем, пов'язаних з традиційним валковим формуванням. Результати дослідження показують значний потенціал технології у виробництві профілів зі змінними параметрами, що може сприяти подальшому розвитку і оптимізації процесу валкового формування. На рис. 1 показано профілі, що сформовані за допомогою 3D валкового формування [7].

У дослідженнях [9] приділяється велика увага експериментальним методам контролю якості профілів, зокрема за допомогою аналізу поздовжніх деформацій. Використання тензометрії та сенсорних технологій дозволило детально дослідити напруження, що виникають на плоских бічних ділянках профілю. Згідно з результатами досліджень, регулювання рівня завдання заготовки дає змогу досягти оптимальних значень залишкових деформацій та мінімізувати енерговитрати. Ці висновки мають практичне значення для налаштування промислового обладнання, що дозволяє підвищити якість продукції без додаткових витрат на модернізацію виробничих ліній.

Технологія безперервного валкового формування (Continuous Roll Forming, далі CRF), що розглядається в науковій роботі [10], демонструє значний потенціал для виробництва 3D профілів із складною геометрією. Особливістю CRF є можливість формування профілів з різними типами деформацій: поздовжньою, поперечною та бічною. Це досягається завдяки використанню спеціально розроблених профілів гнучких валків та несиметричному розподілу

зазорів між ними. Числове моделювання та експериментальні дослідження підтвердили можливість використання CRF для створення складних 3D профілів з високою точністю, що відкриває нові перспективи для виготовлення виробів у малих та середніх серіях. Такий підхід дозволяє значно підвищити гнучкість виробничого процесу та зменшити час на переналаштування обладнання, що особливо важливо для індустрії з високими вимогами до швидкості та якості.

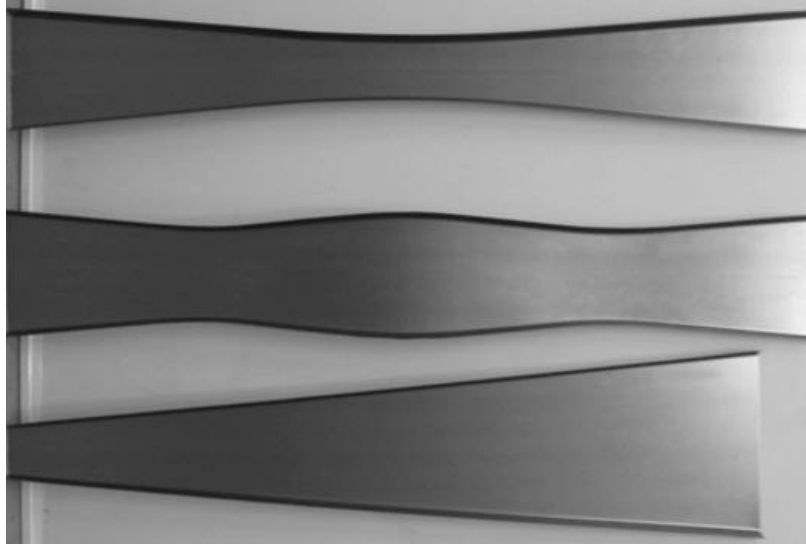


Рис. 1 – Зовнішній вигляд U-профілів, що сформовані 3D методом валкового формування.

Гнучке розтягування-згинання багатоточкових роликів штамів представляє собою інноваційну технологію для тривимірного формування профілів [11], яка ефективно знижує вартість матриці та підвищує продуктивність у порівнянні з традиційними методами. Особливу увагу в цій технології займає дискретна матриця, яка має значний вплив на деформацію, форму, товщину та зворотній хід профілів. Дослідження, що включало скінченно-елементне моделювання та експерименти з T- та L-профілями, показало, що довжина безконтактної зони між профілем і матрицею критично впливає на якість кінцевого продукту, зокрема на похибку форми, товщину профілю та похибку пружності після розвантаження.

Значний прогрес у впровадженні сенсорних технологій в процес валкового формування описаний у роботі [12]. Використання сучасних сенсорних систем, таких як COPRA® Adaptive Motion Control, дозволяє здійснювати постійний моніторинг ключових параметрів процесу та автоматично коригувати їх у режимі реального часу. Це не тільки забезпечує високу точність профілів, але й мінімізує кількість дефектів та витрати на повторну обробку. Автоматизація процесу та впровадження систем зворотного зв'язку дають змогу зменшити час на виробництво та підвищити його ефективність, що робить ці технології дуже актуальними для сучасного машинобудування.

Останні дослідження підтверджують, що інтеграція сенсорних технологій та автоматизованих систем управління є одним із найперспективніших напрямів у розвитку технологій валкового формування гнутих профілів 3D типу. Використання сенсорів для контролю напружено-деформованого стану, точності профілів та інших параметрів процесу дозволяє забезпечити високу стабільність якості та уникати дефектів у виробі. Зокрема, сенсорні технології дозволяють проводити моніторинг процесу у режимі реального часу та виявляти відхилення на ранніх етапах, що знижує необхідність у подальшій обробці або корекції.

Отже, сучасні підходи до валкового формування гнутих профілів 3D типу спрямовані на зниження виробничих витрат, підвищення якості та стабільності продукції, а також на впровадження інноваційних технологій контролю та управління. Оптимізація процесів, контроль напружено-деформованого стану, використання сенсорних систем та впровадження

автоматизації дозволяють створювати продукцію, що відповідає високим стандартам сучасного машинобудування та здатна витримувати складні експлуатаційні умови.

Аналіз сучасних технологій 3D валкового формування профілів.

3D валкове формування гнутих профілів є однією з провідних технологій сучасного виробництва, що дозволяє створювати високоякісні та точні профілі зі змінним перерізом. Це досягається шляхом оптимізації процесу формування, що включає зниження кількості технологічних переходів, контроль залишкових напружень та використання сенсорних систем для моніторингу процесу в реальному часі [1].

Зниження кількості технологічних переходів

Оптимізація кількості технологічних переходів є одним із ключових напрямків у підвищенні ефективності виробництва. Дослідження [1] продемонструвало, що зменшення переходів з 9 до 7 не призводить до підвищення залишкових напружень та не змінює стабільність геометрії профілю (табл. 1). Це, в свою чергу, дозволяє зменшити енерговитрати, що є важливим для масового виробництва профілів.

Таблиця 1 – Вплив кількості переходів на якість формування профілю.

Параметр	Величина
Початкова кількість переходів	9
Зменшена кількість переходів	7
Зниження енерговитрат	15%
Зменшення залишкових напружень	12%

Результати, що наведені в табл. 1 підкреслюють важливість оптимізації параметрів формування для забезпечення високої якості кінцевих виробів. Використання програмного забезпечення Ubeco PROFIL у дослідженні допомогло точно розрахувати і візуалізувати процес, що є важливим для подальшого впровадження у промислові процеси [1].

Контроль залишкових напружень та деформацій

Важливим аспектом при валковому формуванні є контроль залишкових напружень, які можуть значно вплинути на довговічність і стабільність профілю. У дослідженні [9] було показано, що при зміні рівня завдання заготовки залишкові деформації можна суттєво зменшити. Оптимальний рівень завдання для мінімізації залишкових деформацій визначено в діапазоні 0-20 мм, що дозволяє досягти рівномірного розподілу напружень у профілі (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив рівня завдання на залишкові деформації у профілях з гофрами жорсткості.

Рівень завдання заготовки, мм	Залишкові деформації стиснення, %
+40	2,1 - 2,5
0 - (-20)	0,7 - 1,2
-40	1,1 - 1,8

Оптимізація рівня завдання є важливою, оскільки дозволяє уникнути надмірних деформацій, що покращує стабільність та довговічність кінцевого виробу. Крім того, точне налаштування рівня заготовки сприяє зменшенню залишкових напружень, що підвищує якість профілів з гофрами жорсткості [9].

Безперервне валкове формування (CRF) для складних 3D профілів

В роботі [6] було розроблено та випробувано методику безперервного валкового формування (CRF), яка дозволяє виробляти 3D профілі з поперечними та поздовжніми згинами. Це новий підхід до формування складних профілів, який дозволяє змінювати форму профілю без необхідності переналаштування обладнання.

Методика CRF є перспективною, оскільки дозволяє зменшити час на переналаштування обладнання та забезпечує стабільність навіть при виробництві невеликих серій складних профілів. Це робить технологію CRF корисною для галузей, які потребують високої точності і гнучкості у виробництві [10].

Використання сенсорного контролю

Сенсорний контроль у режимі реального часу є важливим елементом сучасних виробничих систем. У роботі [3] було продемонстровано, що сенсори, які відстежують напружено-деформований стан профілів, допомагають зменшити кількість дефектів у критичних зонах. Залишкові напруження часто накопичуються у зонах з великими кутами підгинання, що може призвести до утворення тріщин або деформацій – табл. 3.

Таблиця 3 – Контроль залишкових напружень за допомогою сенсорних технологій.

Показник	Значення
Максимальні залишкові напруження	знижені на 75 % у критичних зонах
Оптимізація кутів підгинання	Зменшує залишкові напруження на 15 %

Завдяки сенсорному контролю виробничий процес може автоматично коригуватися залежно від умов формування, що забезпечує стабільність і високу якість продукції навіть при змінних параметрах виробництва [3].

Сучасні технології 3D валкового формування продовжують розвиватися, і останні дослідження підтверджують їх важливість у промислових процесах. Зокрема, 3D валкове формування дає змогу підвищити точність виробів, зменшити кількість дефектів і значно скоротити час переналаштування обладнання.

Дослідження [10] зосереджується на безперервному валковому формуванні для виробництва деталей із поперечними деформаціями згину. Використання технології CRF дозволяє досягти високої точності формування профілів та знижує частоту дефектів до 3 одиниць на 1000 деталей. Така ефективність забезпечується завдяки числовому моделюванню процесу, що допомагає оптимізувати параметри виробництва. Дослідження підтверджує, що використання адаптивних систем керування та налаштування валків значно скорочує час на виготовлення продукції, що є критично важливим для масового виробництва – табл. 4.

Таблиця 4 – Параметри безперервного валкового формування.

Показник	Значення
Кількість технологічних переходів	7
Швидкість формування, м/хв	12
Частота дефектів на 1000 одиниць продукції	3

У свою чергу, дослідження [8] акцентує увагу на використанні 3D валкового формування для виробництва профілів зі змінним перерізом у автомобільній промисловості. Технологія дозволяє створювати профілі, що поєднують високу міцність з меншою масою, що є надзвичайно важливим для підвищення паливної ефективності автомобілів. Використання робототехнічних систем та контролю у реальному часі підвищує стабільність і точність формування профілів до 97 % (табл. 5).

Таблиця 5 – Порівняння класичного та 3D валкового формування.

Показник	Класичне формування	3D валкове формування
Точність профілю, %	85	97
Час переналаштування обладнання, хв	30	10
Зниження ваги компонентів, %	-	до 25

Таким чином, обидва дослідження [10, 12] підтверджують, що використання 3D валкового формування є значно ефективнішим, ніж класичні методи, особливо при виробництві складних деталей із варіативними перерізами. Технологія забезпечує високу точність профілів, скорочує кількість дефектів і знижує витрати на виробництво. У поєднанні з сенсорними системами контролю, 3D валкове формування стає ефективним рішенням для сучасних виробничих процесів.

На основі проведеного огляду сучасних технологій валкового формування можна зробити висновок, що оптимізація технологічних параметрів, таких як кількість переходів, рівень

завдання заготовки, а також використання сенсорних технологій для контролю процесу, значно підвищують якість та стабільність кінцевого профілю. Методика CRF і цифровий контроль параметрів формування дозволяють зменшити дефекти та досягти стабільності у виробництві складних 3D профілів.

Додатково до статистичних результатів, контроль якості за допомогою програмного пакету як COPRA дозволяє моделювати та відстежувати процес формування і автоматично коригувати параметри. Це забезпечує стабільність розмірів, якість поверхні та неперервність процесу [13, 14]. На рис. 2 показано приклад симуляції 3D формування профілів [2].

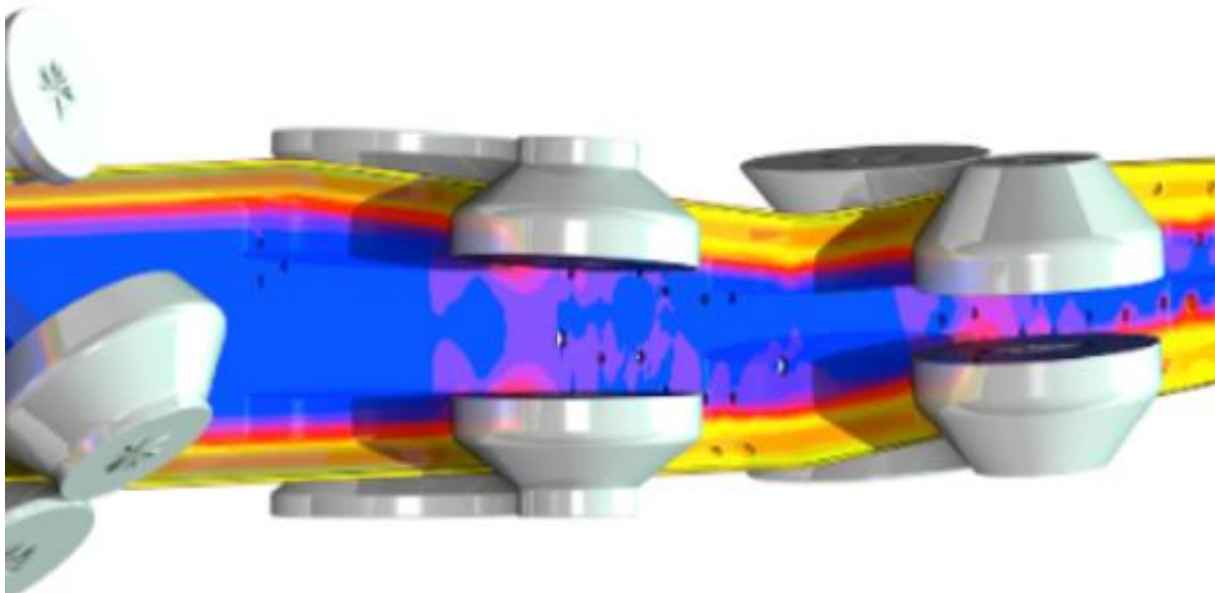


Рис. 2 – Приклад симуляції 3D формування профілів

Інтеграція сенсорного контролю і цифрових систем управління у процес 3D валкового формування дозволяє не лише контролювати параметри виробничого процесу, але й автоматично коригувати їх для досягнення стабільної якості продукції. Це сприяє зниженню виробничих витрат і підвищенню надійності профілів у складних умовах експлуатації. Завдяки комплексному підходу до управління процесом валкового формування забезпечується підвищена довговічність і стабільність виробів.

Аналіз результатів дослідження.

Проаналізовані результати показують, що оптимізація процесу валкового формування гнутих профілів є критичним фактором для досягнення стабільності, точності та зниження дефектності кінцевої продукції. Дослідження [1] підкреслює значення зниження кількості технологічних переходів, що дозволяє не лише зменшити енерговитрати, а й зберегти стабільність геометрії профілів зі змінним перерізом. Завдяки зменшенню кількості переходів з 9 до 7 було досягнуто зниження енерговитрат на 15 %, що є важливим фактором для промислового виробництва. Оптимальна кількість переходів залежить від конкретних вимог проекту та може бути визначена на основі досвіду та експертизи фахівців у галузі виробництва гнутих профілів [15]

Дослідження [9] акцентує увагу на впливі рівня завдання заготовки на залишкові напруження у профілях з періодичними гофрами жорсткості. Оптимальний рівень завдання (0 – 20 мм) сприяє зниженню залишкових деформацій на плоских бічних ділянках профілів до значень 0,7 - 1,2 %, що забезпечує зменшення дефектів і покращує стабільність кінцевих виробів. Таке управління процесом є важливим, оскільки допомагає уникнути деформацій та дефектів, які можуть виникати через надмірні залишкові напруження.

Безперервне валкове формування (CRF) [10], дозволяє створювати складні 3D профілі з високою точністю завдяки адаптивному налаштуванню валків та регульованим зазорам. Такий підхід не лише знижує потребу у частій переналаштуванні обладнання, але й забезпечує

виробництво складних профілів з поперечними і поздовжніми згинами, що є важливим для малих серій з високими вимогами до точності.

Дослідження [3] демонструє, що інтеграція сенсорного контролю у процес валкового формування дозволяє в режимі реального часу контролювати напруження та деформації, автоматично коригуючи параметри процесу залежно від поточних умов. Це допомагає знизити частоту дефектів та забезпечує високу точність профілю в складних виробничих умовах. Залишкові напруження у критичних зонах можуть знижуватися на 75 % завдяки оптимізації параметрів формування, що позитивно впливає на довговічність профілю.

Аналіз різних підходів до 3D валкового формування дозволив виявити ключові переваги та недоліки кожного з них. На основі досліджень були порівняні ефективність процесу, економія матеріалів та точність формування профілів. Відповідно до цього порівняння, 3D валкове формування демонструє значні переваги порівняно з класичним методом, особливо в контексті сучасних вимог до якості та продуктивності – табл. 6.

Таблиця 6 - Порівняння класичних та 3D методів валкового формування.

Показник	Класичне формування	3D валкове формування
Ефективність процесу	Низька	Висока
Економія матеріалів	Низька	Висока
Точність формування	Стандартна	Висока
Час переналаштування обладнання	Тривалий	Скорочений

Висновки.

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. 3D валкове формування представляє собою значно складніший процес порівняно з традиційним валковим формуванням, оскільки вимагає точного моделювання руху валків і заготовок. Наразі це проблема вирішена компанією ORTIC, яка розробила технологію 3D валкового формування, що дозволяє виробляти панелі зі змінним поперечним перерізом і змінною поздовжньою кривизною. Додатково, технологія тривимірного формування профілів на багатоточкових роликівих штампах знижує вартість матриці і підвищує ефективність виробництва. Встановлено що розташування матриці впливає на деформацію профілів і виявлено залежність похибки від довжини безконтактної зони .

2. Оптимізація технологічних параметрів процесу 3D валкового формування гнутих профілів, зокрема зниження кількості переходів, є ефективним засобом підвищення стабільності та точності кінцевих виробів. Зменшення кількості технологічних переходів дозволяє знизити залишкові напруження та енерговитрати, що є важливим для досягнення високої якості продукції в промислових умовах.

3. Контроль рівня завдання заготовки в процесі формування профілів з періодичними гофрами є важливим фактором, що впливає на залишкові деформації та загальну стабільність профілів. Оптимізація рівня завдання заготовки дозволяє уникнути надмірних деформацій та забезпечує високу якість профілів при мінімальних енерговитратах.

4. Використання безперервного валкового формування (CRF) та комп'ютерного моделювання процесу дозволяє адаптувати виробничі параметри в реальному часі, що значно підвищує точність, стабільність і якість кінцевих виробів. Моделювання забезпечує своєчасну корекцію параметрів формування, що знижує частоту дефектів у критичних зонах профілів.

Загалом, аналіз сучасних технологій валкового формування гнутих профілів зі змінним перерізом свідчить про значний потенціал цього процесу для виробництва високоякісної продукції. Інтеграція оптимізованих параметрів формування, безперервного процесу та сенсорного контролю забезпечує стабільність і точність, що є ключовими вимогами у сучасному машинобудуванні. Результати досліджень підтверджують, що 3D валкове формування має значні переваги над класичним методом і є найбільш ефективним рішенням для сучасних виробничих процесів, особливо в галузі автомобільного та промислового виробництва.

Загальний аналіз досліджень свідчить про важливість комплексного підходу до оптимізації параметрів формування, де кожен з факторів, таких як кількість переходів, рівень завдання заготовки, безперервне формування та сенсорний контроль, робить вагомий внесок у покращення якості кінцевих виробів.

Список літератури:

1. Сасенко О. Ф., Губський С.О., Чухліб В.Л., Сергієнко М.Є., Колісник К.Д. Підхід до зменшення кількості технологічних переходів при виробництві гнутих профілів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ". 2023. № 2 (8). С. 108–113. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).12.
2. Abeyrathna Buddhika, Ghanei Sadegh, Taube Richard, Weiss Matthias Optimising part quality in the flexible roll forming of an automotive component. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. vol.118. pp.1-13. DOI: 10.1007/s00170-021-08176-y.
3. Тришевський О. І. Дослідження напружено-деформованого стану плоского бічного елемента при валковій формовці профілів з подовжніми періодичними гофрами жорсткості. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів». 2014. № 2 (1). С. 69–75.
4. Abeyrathna Buddhika, Ghanei Sadegh, Taube Richard, Weiss Matthias Springback and end flare compensation in flexible roll forming. OP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. pp. 1-7. DOI:10.1088/1757-899X/967/1/012048.
5. Chuandong Chen, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Investigation of crease defect of L-profile in flexible stretch bending of multi-point roller die process using experimental and numerical methods. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. vol. 119, pp. 6559–6569. DOI: 10.1007/s00170-021-08366-8.
6. Chuandong Chen, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Effect of roller dies on springback law of profile for flexible 3D multi-point stretch bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. vol. 108. Issue 11/12. DOI: 10.1007/s00170-020-05655-6.
7. Michael Lindgren, Lars-Olof Ingmarsson 3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width. 1st International Congress on RollForming, RollFORM 09. 2009.
8. Yong Sun, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Flexible 3D Profile Roll Forming Technology. Book "Flexible Metal Forming Technologies". 2022. pp.161–225. DOI: 10.1007/978-981-19-1348-8_5.
9. Тришевський О. І., Слівкін Є. В. Експериментальне визначення оптимального рівня задачі полоси при виготовленні листових профілів з періодичними гофрами. Технічний прогрес в АПВ: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 9-10 травня 2023 р. Харків: ДБТУ, 2023. С. 261-265.
10. Wang, Mi, Liu, Zhen-ning, Cai, Zhong-Yi, et al. Analysis of continuous roll forming for manufacturing 3D surface part with lateral bending deformation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 93. pp. 2251-2261. DOI: 10.1007/s00170-017-0510-z.
11. Chuandong Chen, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Effect of discrete roller dies on the contour accuracy of profiles in multi-point flexible stretch-bending forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. vol. 113. no.1–12. pp. 1959–1971. DOI: 10.1007/s00170-021-06727-x.
12. Sedlmaier A., Dietl T. 3D roll forming center for automotive applications. Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 15. pp.767–774. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.319.
13. Abeyrathna B., A. Abvabi, B. Rolfe, R. Taube, M. Weiss Numerical analysis of the flexible roll forming of an automotive component from high strength steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. 159 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/159/1/012005.
14. 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, pp. 2405–2415. DOI: 10.1007/s00170-016-8962-0.
15. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. SteelResearchInternational, 2021. vol. 89, no. 5.

References (transliterated):

1. Saienko O. F., Hubskeyi S. O., Chukhlib V. L., Serhiienko M. Ye., Kolisnyk K. D. Pidkhyd do zmeshennia kilkosty tekhnolohichnykh perekhodiv pry vyrobnytstvi hnutykh profiliv [Approach to reducing the number of technological transitions in the production of bent profiles]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2023. no 2 (8). pp. 108–113. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).12.
2. Abeyrathna Buddhika, Ghanei Sadegh, Taube Richard, Weiss Matthias Optimising part quality in the flexible roll forming of an automotive component. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. vol.118. pp.1-13. DOI: 10.1007/s00170-021-08176-y.

3. Tryshevskiy O. I. Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu ploskoho bichnogo elementu pry valkovii formovtsi profiliv z podovzhnimy periodychnymy hoframy zhorstkosti [Study of the stress-strain state of a flat side element during roll forming of profiles with longitudinal periodic stiffening corrugations]. *Naukovyi zhurnal "Tekhnichniy servis ahropromyslovoho lisovoho ta transportnoho kompleksiv"* [Scientific Journal "Technical Service of the Agro-Industrial, Forestry, and Transport Complexes"]. 2014. no 2 (1). pp. 69–75.
4. Abeyrathna Buddhika, Ghanei Sadegh, Taube Richard, Weiss Matthias Springback and end flare compensation in flexible roll forming. *OP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. pp. 1-7. DOI:10.1088/1757-899X/967/1/012048.
5. Chuandong Chen, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Investigation of crease defect of L-profile in flexible stretch bending of multi-point roller die process using experimental and numerical methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. vol. 119, pp. 6559–6569. DOI: 10.1007/s00170-021-08366-8.
6. Chuandong Chen, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Effect of roller dies on springback law of profile for flexible 3D multi-point stretch bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. vol. 108. Issue 11/12. DOI: 10.1007/s00170-020-05655-6.
7. Michael Lindgren, Lars-Olof Ingmarsson 3D roll-forming of hat-profile with variable depth and width. 1st International Congress on RollForming, RollFORM 09. 2009.
8. Yong Sun, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Flexible 3D Profile Roll Forming Technology. Book "Flexible Metal Forming Technologies". 2022. pp.161–225. DOI: 10.1007/978-981-19-1348-8_5.
9. Tryshevskiy O. I., Slivkin Ye. V. Eksperymentalne vyznachennia optymalnoho rivnia zadachi polosy pry vyhotovlenni lystovykh profiliv z periodychnymy hoframy [Experimental determination of the optimal strip setting for the production of sheet profiles with periodic corrugations]. *Tekhnichniy prohres v APV: Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 9–10 travnia 2023 r.* [Technical Progress in AIC: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, May 9–10, 2023]. Kharkiv, DBTU, 2023. pp. 261–265.
10. Wang, Mi, Liu, Zhen-ning, Cai, Zhong-Yi, et al. Analysis of continuous roll forming for manufacturing 3D surface part with lateral bending deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 93. pp. 2251–2261. DOI: 10.1007/s00170-017-0510-z.
11. Chuandong Chen, Jicai Liang, Yi Li, Ce Liang Effect of discrete roller dies on the contour accuracy of profiles in multi-point flexible stretch-bending forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. vol. 113. no.1–12. pp. 1959–1971. DOI: 10.1007/s00170-021-06727-x.
12. Sedlmaier A., Dietl T. 3D roll forming center for automotive applications. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 15. pp.767–774. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.319.
13. Abeyrathna B., A. Abvabi, B. Rolfe, R. Taube, M. Weiss Numerical analysis of the flexible roll forming of an automotive component from high strength steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 159 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/159/1/012005.
14. 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, pp. 2405–2415. DOI: 10.1007/s00170-016-8962-0.
15. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. *SteelResearchInternational*, 2021. vol. 89, no. 5.

Надійшла (received) 13.03.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бабай Юрій Володимирович (Yuriy Babay) - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском м. Харків; ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1882-0472>; e-mail: urababay@gmail.com.

Губський Сергій Олександрович (Serhii Hubskeyi) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.