

Бабай Ю. В.  
Губський С. О.  
Явтушенко А. В.  
Кошкарів Ю. Ю.  
Натаров М. В.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АНАЛІТИЧНИХ ТА ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ПРИ ВАЛКОВОМУ ФОРМУВАННІ ШВЕЛЕРІВ

*Метою даної роботи є підвищення точності прогнозування та попередження дефектів форми (втрати стійкості кромки) при виробництві гнутих профілів відкритого типу шляхом удосконалення методики аналізу напружено-деформованого стану. На підставі порівняльного дослідження аналітичних та чисельних методів моделювання обґрунтована необхідність врахування реальних фізичних факторів процесу, таких як контактне тертя та енергія надлишкових деформацій. Встановлено, що геометричні методи розрахунку схильні занижувати рівень реальних напружень, прогнозуючи деформування в пружній зоні, тоді як скінченно-елементний аналіз виявляє критичні зони пластичності. Теоретичні дослідження виконувалися для процесу формування швелера зі сталі 10 із використанням САЕ-систем. Розроблено скінченно-елементні моделі поведінки металу в клітках, які дозволили дослідити динаміку накопичення поздовжніх деформацій на кромці профілю. На основі аналізу отриманих моделей визначено вплив геометричних параметрів формувального стану на якість продукції. Доведено доцільність збільшення міжклітьової відстані як ефективного методу боротьби з хвилюваннями. Порівняльний аналіз результатів моделювання для різних кінематичних схем показав, що раціоналізація бази деформування з 1000 мм до 1400 мм забезпечує зниження пікових значень поздовжньої деформації з 3,5 % до 1,2 %, що гарантує стабільність технологічного процесу та відсутність браку.*

**Ключові слова:** валкове формування, швелер, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, поздовжня деформація, кліть, калібрування валків.

Традиційні методи обробки листового металу, такі як різання, штампування та гнуття, часто передбачають багатостадійність технологічного процесу, що неминуче призводить до зниження виробничої ефективності та точності готових виробів. У відповідь на ці виклики технологія валкового формування зарекомендувала себе як ефективна альтернатива, що базується на використанні послідовності формувальних валків для безперервного згинання металевих смуг та штаб у виробі з необхідним поперечним перерізом [1].

Актуальність використання та виробництва гнутих профілів цим методом зумовлена поєднанням високої продуктивності з суттєвою економією матеріальних та енергетичних ресурсів [2]. Технологія дозволяє реалізувати поступове деформування металу як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках, що відкриває можливості для створення тонкостінних профілів зі складною геометрією [3]. При цьому забезпечується максимальна міцність і жорсткість готових деталей за умови мінімізації витрат металу, що робить валкове формування незамінним методом для масового виробництва у сфері обробки тиском листових металів. Завдяки таким перевагам, як висока точність, стабільність геометричних параметрів та оптимізація використання матеріалів, цей метод є основним і поширеним виробничим процесом у сучасній промисловості [4].

Мета даної роботи – підвищення точності прогнозування та попередження дефектів форми (втрати стійкості кромки) при виробництві гнутих профілів відкритого типу шляхом удосконалення методики аналізу напружено-деформованого стану.

Попри значні переваги технології, процес валкового формування відкритих профілів, зокрема швелерів (U-подібних перерізів), супроводжується підвищеним ризиком втрати стійкості кромки порівняно із замкнутими профілями. Тому в сучасних дослідженнях значна увага приділяється аналізу поздовжніх деформацій кромки, оскільки саме вони є основним чинником утворення хвилі.

Технологія виготовлення швелерів є критично залежною від геометричних параметрів налаштування обладнання. Аналіз причин виникнення дефектів форми представлено в роботі [5]. Автори встановили ієрархію впливу технологічних факторів та довели, що збільшення

відстані між клітьми дозволяє ефективно зменшити пікові поздовжні деформації та мінімізувати ризик втрати стійкості. Це узгоджується з дослідженнями [6], де зазначено, що ключовими факторами, які визначають величину розтягнення кромки, є висота полиці профілю та міжклітьова відстань. Поєднання значних кутів підгинання з недостатньою базою деформування призводить до стрімкого досягнення критичної межі деформацій.

Вплив цих параметрів також детально розглянуто в роботах [7, 8]. Зокрема, використовуючи серію ортогональних експериментів, автори [7] виявили, що домінуючим фактором є товщина заготовки: зі збільшенням товщини стійкість кромки зростає, тоді як збільшення висоти полиці провокує зростання пікових деформацій. У роботі [8] підтверджено, що пікові значення поздовжньої деформації є індикатором дефекту типу «поздовжній вигин», а оптимізація (збільшення) міжклітьової відстані сприяє зниженню їх амплітуди.

Окрім налаштування стана, важливу роль відіграє стратегія калібрування. У дослідженні [9] на прикладі високоміцного алюмінієвого сплаву AA7075 доведено, що традиційна стратегія подвійного радіуса ( $2R$ ) провокує появу різких піків деформації (до 0,0198), що викликає хвилеутворення. Натомість застосування  $W$ -подібної стратегії методом «Downhill» ( $W2$ ) знижує максимальну деформацію до безпечного рівня. Аналогічні висновки отримано в роботі [10] при формуванні труб з титанового сплаву, де визначено критичний поріг деформації на рівні 0,9 % та підтверджено ефективність стратегії зі зниженням рівня піків деформації.

Важливим аспектом проектування є вибір інструментарію для розрахунків. У роботах [11] та [12] піднімається проблема обмеженості традиційних аналітичних методів. Досліджуючи формування профілів зі сталі Q235, автори [11] дійшли висновку, що аналітичні формули дають лише наближену оцінку і не здатні точно спрогнозувати пікові деформації в зоні захоплення. У роботі [12] зазначено, що спрощені математичні моделі розраховують деформації для «ідеальної форми», ігноруючи фізичний факт втрати стійкості. У реальному процесі виникнення дефектів хвилястого типу суттєво змінює розподіл напружень, що робить аналітичні прогнози некоректними. Це підтверджує необхідність використання повноцінного скінченно-елементного моделювання для точної верифікації технології.

Критичним аспектом проектування технологічних процесів виготовлення гнутих профілів є контроль поздовжніх деформацій на кромці смуги. Саме ця зона зазнає найбільшого розтягнення, що створює ризик втрати стійкості заготовки та виникнення дефектів типу «хвилястість». Математично поздовжня деформація  $\varepsilon_{xx}$  визначається як градієнт переміщення вздовж осі прокатки  $X$  (1):

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1)$$

де  $u$  – вектор переміщення вздовж осі  $X$ ;  $x$  – координата точки в напрямку прокатки.

Повний напружено-деформований стан матеріалу в будь-якій точці описується тензором деформацій другого порядку. У декартовій системі координат він представлений матрицею, що містить дев'ять компонентів (2):

$$\varepsilon_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  – нормальні деформації (розтягнення/стискання) вздовж відповідних осей;  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{zx}$  – компоненти зсувних деформацій.

Враховуючи властивість симетрії тензора деформацій ( $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ ), кількість незалежних компонентів зменшується до шести, що спрощує розрахунки в системах чисельного моделювання (зокрема QForm). При цьому додатне значення поздовжньої деформації ( $\varepsilon_{xx} > 0$ ) вказує

на розтягнення волокон матеріалу, від'ємне ( $\varepsilon_{xx} < 0$ ) – на їх стискання, а нульове значення відповідає нейтральній лінії деформації.

Специфіка процесу безперервного валкового формування полягає в тому, що величина поздовжніх деформацій не є постійною. Вона змінюється циклічно, досягаючи пікових значень безпосередньо в зоні деформації (у валках) та частково релаксуючи (зменшуючись за модулем) під час проходження металу через міжклітьові проміжки. Саме амплітуда цих пікових значень та залишкова деформація після релаксації є головними критеріями оцінки якості профілю.

Ключовим параметром при розробці технології формотворення є гранична деформація втрати стійкості (англ. *Buckling Limit Strain*, далі – BLS). Це критичне значення поздовжньої деформації, досягнення якого в одній формувальній клітці призводить до незворотної втрати стійкості кромки [13]. Величина BLS залежить від товщини матеріалу, ширини полиці та механічних властивостей заготовки. Критично важливо, щоб пікові значення нормальної деформації вздовж осі профілювання не перевищували BLS для конкретного матеріалу.

Визначальним фактором виникнення геометричних дефектів (зокрема, хвилястості кромки) є характер розподілу поздовжніх деформацій у полиці профілю. У дослідженні [14] зазначено, що існуючі спрощені аналітичні моделі часто не здатні коректно передбачити пікові значення та розподіл деформацій, особливо у зонах переходу. Аналітичні розрахунки, що припускають «ідеальну» форму без дефектів, мають низьку кореляцію з реальними фізичними процесами у випадках значних деформацій. Це обґрунтовує необхідність використання повноцінного скінченно-елементного моделювання для верифікації результатів.

У нашому дослідженні аналітичний модуль UBECO PROFIL використовувався лише для попереднього розрахунку траєкторії (калібровки). Детальний аналіз напружено-деформованого стану та оцінку ризику хвилеутворення проведено в середовищі QForm, що дозволило виявити критичні зони, які не враховуються аналітичними алгоритмами.

Об'єктом дослідження обрано процес валкового формування гнучого профілю типу «швелер» (U-channel) розмірами  $120 \times 60 \times 6$  мм з кінцевим радіусом згину 10 мм. Матеріалом заготовки слугує конструкційна вуглецева Сталь 10. У налаштуваннях моделювання задано наступні механічні властивості: межа плинності  $\sigma_T = 210$  МПа, тимчасовий опір  $\sigma_B = 340$  МПа, відносне видовження  $\delta = 30$  %.

Дослідження проводилося у два етапи:

- перший етап - геометричне проектування (CAD);
- другий етап - чисельне моделювання (CAE).

На першому етапі в програмному комплексі UBECO PROFIL було розроблено схему калібрування валків та створено квіткову модель (flower pattern) формотворення профілю (рис. 1), що складається з 12 технологічних переходів, міжклітьова відстань 1000 мм. Причому, для уникнення пруження останні 4-рі переходи мають наступні кути підгинання  $88^\circ \rightarrow 80^\circ \rightarrow 88^\circ \rightarrow 90^\circ$ , передостанній перехід має поверхні валків не циліндричної форми, а з радіусом 1718 мм.

Для зменшення впливу різниці окружних швидкостей по висоті робочих ділянок верхнього та нижнього валків було застосовано кути або ділянки звільнення. Ці елементи калібрування необхідні також для зменшення відносного ковзання – різниці швидкостей між поверхнею валка та металевою штабою в зоні контакту. Це дозволяє знизити енергетичні втрати на тертя та запобігти пошкодженню поверхні виробу. Наявність ділянок звільнення є особливо важливою при профілюванні високих профілів, де формування відбувається поетапно, а різниця швидкостей є найбільш суттєвою.

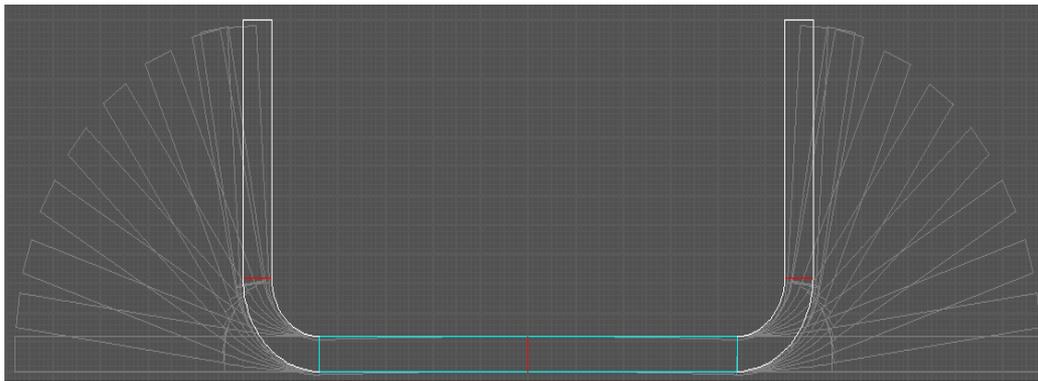


Рис. 1. Квіткова модель (flower pattern) формотворення профілю типу «швелер» за 12 переходів:  $0^\circ \rightarrow 8^\circ \rightarrow 18^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 42^\circ \rightarrow 54^\circ \rightarrow 66^\circ \rightarrow 78^\circ \rightarrow 88^\circ \rightarrow 80^\circ \rightarrow 88^\circ \rightarrow 90^\circ$

Для попередньої оцінки якості калібрування виконано аналіз напружень за допомогою модуля Profile Stress Analysis (далі PSA). Результати розрахунку в UBECO PROFIL (рис. 2) показали, що теоретичні поздовжні напруження на кромці смуги не перевищують 11 % від границі плинності матеріалу. Це свідчить про геометричну коректність розробленої траєкторії руху металу («ідеальний потік») без врахування фізичних нелінійностей.

Stress related to the yield stress:

Band edge only      Material    Сталь 10      Re = 210 MPa

Center Line Forming

	%	Ps	%
	1	1	1
	3	2	3
	3	3	3
	5	4	5
	10	5	10
	11	6	11
	10	7	10
	11	8	11
	11	9	11
	7	10	7
	5	11	5
	0	12	0

Re

Рис. 2. Розрахунковий розподіл відносних поздовжніх напружень на кромці смуги для Сталі 10 (аналіз PSA в UBECO PROFIL) при міжкільтвовій відстані 1000 мм

На другому етапі, для врахування реальних фізичних факторів, таких як пружно-пластичні властивості матеріалу, контактне тертя та надлишкові деформації, геометрію інструменту було експортовано до середовища скінченно-елементного аналізу QForm.

В середовищі QForm було проведено серію симуляцій процесу формування з метою дослідження впливу геометричних параметрів стану на напружено-деформований стан заготовки. Для моделювання формотворення було застосовано методику запропоновану в [15]. В якості змінного параметра було обрано міжкільтвову відстань. Моделювання виконувалося для трьох варіантів відстані: 1000, 1200 та 1400 мм. При чому, як правило, для таких діаметрів поверхні кочення верхнього та нижнього валків (582,5 мм та 250 мм відповідно) міжкільтцова відстань обирається 1200–1400 мм.

Основним критерієм оцінки якості профілю та ризику виникнення дефектів (хвилястості кромки) в даному аналізі симуляції було обрано величину та характер розподілу поздовжньої деформації  $\epsilon_{xx}$  на кромці профілю вздовж осі профільовання X. Динаміку накопичення цих деформацій під час проходження смугою технологічних переходів при різних міжкільтвових відстанях показано на рисунку 3.

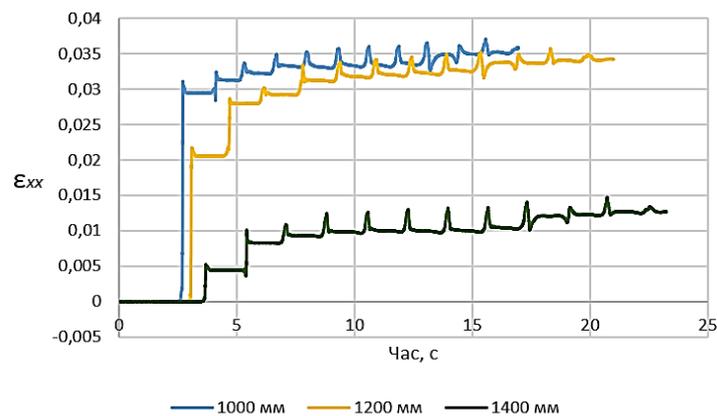


Рис. 3. Залежність поздовжньої деформації ( $\epsilon_{xx}$ ) на кромці профілю від часу формування для різних міжклітьових відстаней

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 3, демонструє, що кінематика процесу та характер накопичення деформацій критично залежать від обраної геометричної схеми стана, зокрема від відстані між клітьми. При аналізі режиму з мінімальною відстанню 1000 мм (синя крива) фіксується різке, стрибкоподібне зростання амплітуди поздовжніх деформацій, яке швидко досягає критичного рівня 0,035 (3,5 %). Таке значення свідчить не просто про пружне напруження, а про глибоке пластичне перерозтягнення волокон кромки, оскільки воно значно перевищує межу плинності матеріалу. Це створює передумови для незворотного видо-вження кромки та появи дефекту «хвилястості» ще на ранніх етапах формування. Водночас, збільшення бази деформації до 1400 мм (зелена крива) дозволяє перетворити процес у більш «м'який» режим. Завдяки подовженню траєкторії руху металу пікові значення деформації знижуються майже втричі – до рівня 0,012 (1,2 %). Таке зниження інтенсивності навантаження забезпечує значно плавніший перехід смуги між калібрами, мінімізує накопичення залишкових напружень та гарантує стабільне формування профілю без ризику втрати стійкості полиць.

Окремої уваги заслуговує порівняння отриманих результатів із даними попереднього аналізу в модулі PSA (UBECO PROFIL). Як зазначалося вище, геометричний розрахунок прогнозував максимальні напруження на рівні 11 % від границі плинності, що передбачало роботу виключно в пружній зоні. Натомість чисельне моделювання в QForm зафіксувало наявність значних пластичних деформацій.

Така суттєва розбіжність пояснюється фундаментальними відмінностями в алгоритмах. Модуль PSA базується на моделі «ідеального потоку», розраховуючи теоретичну різницю довжин траєкторій без урахування силових факторів. Цей метод ігнорує енергію, витрачену на надлишкові деформації – викривлення металу, які не є геометрично необхідними, але виникають через опір матеріалу та ефекти зворотної натяжки між клітьми. Моделювання методом скінченних елементів в QForm враховує ці фізичні аспекти, а також контактне тертя, демонструючи, що в реальних умовах кромка профілю зазнає значно більшого розтягнення. Це підтверджує, що розробка технології профілювання валковим формуванням гнутих профілів, що базується виключно на аналітичних розрахунках не забезпечує необхідної точності.

Важливо також зазначити, що виявлені в ході моделювання методом скінченних елементів флуктуації (коливання) напружено-деформованого стану кромки є джерелом динамічної нестабільності смуги в калібрі. Фізично ці періодичні зміщення кромки та зміна сил тертя генерують механічні вібрації технологічної системи «валки–смуга». Оскільки амплітуда цих вібрацій корелює з величиною поздовжньої деформації, це відкриває можливість використання вібраційного моніторингу для непрямого контролю технологічного процесу. Відстежуючи параметри вібрації на станині кліті, кромці заготовки під час профілювання, стає можливим виявляти початок втрати стійкості (хвилеутворення) в режимі реального часу та оперативно коригувати налаштування стана.

## ВИСНОВКИ

Встановлено розбіжність між результатами аналітичного та чисельного підходів при моделюванні валкового формування швелера зі Сталі 10. Доведено, що геометричний метод (реалізований в UBECO PROFIL) схильний ідеалізувати процес, прогнозуючи роботу матеріалу переважно в пружній зоні. Натомість скінченно-елементний аналіз (QForm) виявляє значні пластичні деформації, що виникають внаслідок дії факторів тертя та надлишкових деформацій, які ігноруються спрощеними моделями.

Підтверджено значну роль величини міжклітьової відстані у забезпеченні геометричної точності профілю. Чисельне моделювання показало, що збільшення бази деформування з 1000 мм до 1400 мм дозволяє знизити пікові значення поздовжньої деформації з критичного рівня 3,5 % до безпечних 1,2 %. Це забезпечує стабільність процесу формування та усуває ризик виникнення дефекту «хвилястість кромки».

На основі отриманих даних сформульовано рекомендацію застосовувати комбіновану стратегію розробки технології валкового формування гнутих профілів:

- використання аналітичних інструментів (типу UBECO PROFIL) для швидкого синтезу калібрування та розрахунку траєкторії;
- обов'язкова верифікація кінематичних параметрів за допомогою скінченних елементів (типу QForm) для виявлення прихованих зон ризику та перевірки напружено-деформованого стану.

Перспективи подальших досліджень Моделювання виявило наявність локальних піків поздовжньої деформації, які є передвісниками втрати стійкості, але не фіксуються аналітичними методами. Це обґрунтовує необхідність подальших досліджень, спрямованих на:

- встановлення кореляції між розрахунковими піками деформацій та параметрами вібрації клітей стану для створення системи оперативного вібромоніторингу;
- розробку методики раціоналізації калібрування для «згладжування» епюру деформацій, що стане базою для впровадження систем адаптивного керування процесом.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Wang J., Liu H. M., Li S. F., Chen W. J. Cold roll forming process design for complex stainless-steel section based on COPRA and orthogonal experiment. *Materials*. 2022. 15(22). 8023, <https://doi.org/10.3390/ma15228023>.
2. Simonetto E., Ghiotti A., Bruschi S. Agile manufacturing of complex shaped bent profiles by incremental deformation. *Manufacturing Letters*. 2023. 36. pp. 40–43, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.01.004>.
3. Sun Y., Sedlmaier A., Guo Q., Zhang D., Xia H., Cu S., Dong J., Ren Y. Flexible 3D Profile Roll Forming Technology. Flexible Metal Forming Technologies. *Springer Nature Singapore*. 2022. pp. 161–225, [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1348-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1348-8_5).
4. Ren Y., Rubaiee S., Ahmed A., Othman A. M., Arora S. K. Multi-objective optimization design of steel structure building energy consumption simulation based on genetic algorithm. *Nonlinear Engineering*. 2022. 11(1). pp. 20–28, <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0012>.
5. Mohammadi Najafabadi H., Moslemi Naeini H., Safdarian R., Kasaei M. M., Akbari D., Abbaszadeh B. Effect of forming parameters on edge wrinkling in cold roll forming of wide profiles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2885-x>.
6. Halmos G. T. Roll forming handbook. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2006. 584 p., <https://doi.org/10.1201/9781420030693>.
7. Liang J., Chen C., Liang C., Li Y., Chen G., Wang A. One-time roll-forming technology for high-strength steel profiles with section. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Article ID 6505914. 10 p., <https://doi.org/10.1155/2019/6505914>.
8. Safdarian R., Moslemi Naeini H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section. *Thin-Walled Structures*. 2015. 92. pp. 130–136, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.002>.
9. Suckow T., Schroeder J., Groche P. Roll forming of a high strength AA7075 aluminum tube. *Production Engineering*. 2021. 15(5). pp. 573–586, <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01046-2>.
10. Yue M., Zhang J., Xiao B., et al. Numerical and experimental analysis of edge wave defect control during TA2 circular tube cold roll forming. *Engineering Reports*. 2024. 6(11). e12913, <https://doi.org/10.1002/eng2.12913>.
11. Hui X., Wang X. Forming quality analysis on the cold roll forming C-channel steel. *Materials*. 2018. 11(10). 1911, <https://doi.org/10.3390/ma11101911>.
12. Sreenivas A., Abeyrathna B., Rolfe B., Weiss M. Longitudinal strain and wrinkling analysis of variable depth flexible roll forming. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. 81. pp. 414–432, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.063>.

13. Farzin M., Salmani Tehrani M., Shameli E. Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. 125–126. pp. 626–632, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00357-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00357-6).

14. Soyaslan M. The effects of roll forming pass design on edge stresses. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. 2018. 36(3). pp. 677–691.

15. Babai Yu. V., Yavtushenko A. V., Hubskeyi S. O., Kulyk H. H. Simulation of roll forming for U-shaped bent profiles. *Theory and Practice of Metallurgy*. 2025. (2). pp. 75–79, <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2025.11>.

**Babai Y., Hubskeyi S., Yavtushenko A., Koshkarov Y., Natarov M. Comparative analysis of analytical and numerical methods for defect prediction in u-channel roll forming.**

*The aim of this study is to improve the accuracy of prediction and prevention of shape defects (specifically edge buckling) in the production of open-type roll-formed profiles by refining the methodology for stress-strain state analysis. Based on a comparative study of analytical and numerical modeling methods, the necessity of considering real physical factors of the process, such as contact friction and redundant deformation energy, is substantiated. It is established that geometric calculation methods tend to underestimate actual stress levels by predicting deformation within the elastic zone, whereas finite element analysis reveals critical zones of plasticity. Theoretical studies were conducted on the roll forming process of a U-channel made of Steel 10 using CAE systems. Finite element models of metal behavior in the forming stands were developed, allowing for an investigation into the dynamics of longitudinal strain accumulation at the profile edge. Based on the analysis of the obtained models, the influence of the roll forming mill's geometric parameters on product quality was determined. The feasibility of increasing the inter-stand distance as an effective method for mitigating wave formation has been proven. A comparative analysis of simulation results for various kinematic schemes showed that rationalizing the deformation base from 1000 mm to 1400 mm ensures a reduction in peak longitudinal strain values from 3.5 % to 1.2 %, thereby guaranteeing process stability and the absence of defects.*

**Keywords:** roll forming, U-channel, stress-strain state, finite element method, longitudinal strain, forming stand, roll pass design.

**Бабай Юрій Володимирович** – аспірант НТУ «ХПІ»

**Babay Yuriy** – Graduate student NTU «KhPI»

E-mail: [urababay@gmail.com](mailto:urababay@gmail.com)

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1882-0472>

**Губський Сергій Олександрович** – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»

**Hubskeyi Serhii** – Candidate of Technical Science, Associate Professor NTU «KhPI»

E-mail: [gubskiyso@gmail.com](mailto:gubskiyso@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-9139>

**Явтушенко Андрій Володимирович** – аспірант НТУ «ХПІ»

**Yavtushenko Andrii** – Graduate student NTU «KhPI»

E-mail: [andrii.yavtushenko@gmail.com](mailto:andrii.yavtushenko@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9829-5482>

**Кошкарів Юрій Юрійович** – канд. техн. наук, ст. науковий співробітник, НТУ «ХПІ»

**Koshkarov Yuriy** – Candidate of Technical Science, Senior Researcher NTU «KhPI»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1430-0154>

**Натаров Микита Вячеславович** – аспірант НТУ «ХПІ»

**Natarov Mykyta** – Graduate student NTU «KhPI»

E-mail: [nikitanatarov@gmail.com](mailto:nikitanatarov@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3409-3376>.

НТУ «ХПІ» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

NTU «KhPI» – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

Стаття надійшла до редакції 05.05.2025