

УДК 621.771

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-30>

ЦИФРОВЕ РІШЕННЯ ДЛЯ КАЛІБРОВКИ ВАЛКІВ: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКАТКИ В КАЛІБРАХ «ОВАЛ – КРУГ»

Штода Максим Миколайович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-3918-2492

Павлюк Руслан Дмитрович,

аспірант кафедри металургії імені професора В. І. Логінова

Дніпровського державного технічного університету

Складні та коштовні комп'ютерні програми поки що не знайшли широкого застосування для вирішення виробничих завдань на прокатних станах. Основний акцент робиться переважно на практичний досвід і виробничі експерименти. Водночас оптимізація виробничого процесу лише з урахуванням експериментальних досліджень пов'язана зі значними часовими і фінансовими затратами. Тому це також неефективно. Це призвело до того, що нині провідні організації та вчені займаються розробленням швидкодіючих інженерних комп'ютерних систем для автоматизованого проєктування калібровки валків. Метою роботи є розроблення діджитального рішення для калібровочного бюро, яке можна використовувати як для конструювання, так і для оптимізації калібровки валків, а також для аналізу ефективності налаштування прокатного обладнання на основі універсальної математичної моделі безперервної прокатки простих профілів у системі калібрів «овал – круг». У запропонованій моделі використовується варіаційний принцип механіки суцільного середовища мінімуму сумарної потужності внутрішніх та зовнішніх сил в осередку деформації – метод Рітца.

Розроблена математична модель може бути використана для дослідження формозміни металу за безперервної прокатки на сортових станах у системі калібрів «овал – круг». Дана модель також рекомендується до використання як розрахунковий модуль для визначення деформації металу під час прокатки у високошвидкісному проволочному блоці із загальним приводом.

Ключові слова: безперервна прокатка, варіаційний метод, круглий профіль.

Shtoda Maksym, Pavliuk Ruslan. Digital solution for roll pass design process of simple profiles

Complex and expensive programs have not yet found wide application for solving production problems on rolling mills. The main emphasis is mainly on practical experience and production experiments. At the same time, optimization of the production process only on the basis of experimental studies is associated with significant time and financial costs. Therefore, it is also ineffective. This has led to the fact that currently a few leading organizations and scientists are engaged in the development of high-speed engineering computer systems for automated design of profile rolling calibers. The purpose of this work is to develop a digital solution for optimal roll pass design, as well as for analyzing the efficiency of rolling equipment adjustment based on a universal mathematical model of continuous rolling of simple profiles in the «oval-circle» calibers system. The proposed model uses the variational principle of continuous medium mechanics of the minimum total power of internal and external forces of the deformation zone – the Ritz method.

The developed mathematical model can be used to study the metal deformation during continuous rolling in the «oval – circle» calibers system. This model is also recommended for use as a calculation module for determining metal deformation during rolling in a high-speed wire block with a joint drive.

Keywords: continuous rolling, variation method, round profile.

Без перебільшення можна сказати, що сучасну людину оточує «паралельний» цифровий світ: соціальні мережі, товари та послуги Інтернету, розумна побутова техніка та інші цифрові елементи життя. Не є винятком і такі сфери людського життя, як бізнес, виробництво, логістика, торгівля, економіка у цілому. Цифрові технології дедалі глибше і міцніше проникають у всі галузі людського життя, змінюючи

їхню сутність, точніше сутність їхньої взаємодії з людиною. Якщо узагальнити всі тенденції технологічного розвитку сучасного суспільства, можна констатувати, що цифрова економіка дедалі більше стає реальністю.

Концепція цифрової економіки була сформульована ще у 1990-х роках, проте єдиного формулювання поняття «цифрова економіка» не існує досі. За версією Комісії ООН із

торгівлі та розвитку (UNCTAD) «цифрова економіка – застосування цифрових технологій на основі Інтернету для виробництва та торгівлі товарами та послугами» [1]. Під цифровою економікою також можуть розуміти економіку, засновану на інформаційно-комунікаційних технологіях, Інтернет-економіку, вебекономіку, є й інші визначення. Цифрова економіка і, отже, цифрові трансформації впливають на економічний розвиток суспільства, держави, регіону, підприємства.

Цифрова трансформація підприємства – це програма проєктів з автоматизації бізнес-процесів і технологій [2]. У силу високого ступеня автоматизації, наявності та доступності цифрових технологій та систем трансформації схильні не тільки і не стільки до процесів, скільки до основних продуктів компаній.

На думку фахівців Morgardshammar [3], забезпечення сучасних вимог до продуктивності та якості на сортових станах вимагає постійного аналізу існуючих процесів та обладнання, що неможливе без використання спеціального програмного продукту. Для цього фірма пропонує власну розробку WICON. Докладніше цей програмний продукт описано в роботі [4], аналіз якої свідчить про істотні недоліки математичної моделі, закладеної в основу програми. Головний недолік – це неточності розрахунку розширення, які неминуче виникають під час використання формули Вусатовського.

Для підвищення точності розрахунку сучасні дослідники найчастіше використовують програмне забезпечення на основі МКЕ. Проте, як зазначено в роботі [5], досвідчений калібрувальник здатний спроєктувати, випробувати в роботі та оптимізувати калібри до кінцевого стану за такий короткий проміжок часу та з такою точністю, з якою не може зрівнятися жодне відоме на даний момент програмне забезпечення МКЕ. Сьогодні використання кінцево-елементних програм для моделювання процесів сортової прокатки дуже обмежене. Слід зазначити, що їх застосування може бути виправдане, якщо необхідно вивчити закономірності течії металу та (або) розподілу напружень в осередку деформації. Прикладом такого комплексного та складного дослідження може бути робота [6], де за допомогою кінцево-елементного аналізу досліджувалися особливості формоутворення двотаврової балки з низьковуглецевої сталі під час прокатування в обтискній кліті.

Таким чином, складні та коштовні програми поки що не знайшли широкого застосування для вирішення виробничих завдань на прокатних станах. Основний акцент робиться

переважно на практичний досвід і виробничі експерименти. Водночас оптимізація виробничого процесу лише на основі експериментальних досліджень пов'язана зі значними тимчасовими та фінансовими витратами. Тому це також неефективно. Це призвело до того, що сьогодні нечисленні провідні організації та вчені займаються розробленням швидкодіючих інженерних комп'ютерних систем для автоматизованого проєктування калібрів прокатки профілів. Так, у роботі [7] основна увага приділяється інтеграції КЕ-моделювання процесу прокатки з проєктуванням калібрів прокатки для його ефективності та автоматизації для широкого спектру профілів. Моделі враховують характеристики обладнання стану, матеріалу, що прокочується, та інші основні параметри прокатки.

Програмне забезпечення, що подібне до описаного в роботі [3], розроблено вітчизняними вченими ТОВ «ДОНІКС» [8]. У ньому використовується моделювання на основі математичних формул із високою точністю та швидкістю розрахунку. Аналіз форми фактичних та розрахункових бічних кромek розкатів [8] показує, що з найбільшою похибкою визначається ширина контакту смуги з валками.

Таким чином, огляд наукової літератури показує, що діджиталізація калібрувального бюро прокатного підприємства відбувається, насамперед, у напрямі впровадження спеціалізованого програмного забезпечення, корисного для розроблення та оптимізації калібрування валків, а також для аналізу ефективності налаштування прокатного обладнання.

Метою роботи є розроблення діджитального рішення для калібровочного бюро, яке можна використовувати як для конструювання, так і для оптимізації калібровки валків, а також для аналізу ефективності налаштування прокатного обладнання на основі універсальної математичної моделі безперервної прокатки простих профілів у системі калібрів «овал – круг».

У запропонованій моделі використовується варіаційний принцип механіки суцільного середовища мінімуму сумарної потужності внутрішніх та зовнішніх сил осередку деформації. Нині двома найбільш розробленими методами вирішення варіаційних задач обробки металів тиском є метод кінцевих елементів (МКЕ) та метод Рітца. Вище було зазначено деякі недоліки методу кінцевих елементів під час вирішення завдань деформації – це коштовність та «важкість» продукту.

Використання методу Рітца дає змогу з достатньою для систем автоматизації точністю визначати коефіцієнти деформації для

простих та складних форм осередку деформації. Однак, як зазначено у [9], спроба описати поле швидкостей рівномірними функціями для осередку деформації зазвичай стикається з великими труднощами. Тому найбільш раціональним підходом до вирішення завдань прокатки в калібрах є поділ фактичної зони деформації на активні, пасивні та перехідні ділянки. Потім для кожної частини зони підбирається поле швидкостей з урахуванням їх взаємодії один з одним [9]. Ця математична модель не є універсальною. Щоразу необхідно розбивати осередок деформації на частини, потім отримувати компоненти тензора швидкостей деформацій і вирішувати варіаційне рівняння. Також існують проблеми, пов'язані з визначенням меж осередку деформації складної форми та ін. Тому пропонується під час визначення формозміни металу в кожному калібрі системи «овал – круг» замінити складний профіль розкату на еквівалентний прямокутник за методом відповідної смуги, а фактичну форму калібру – на «гладку бочку» (рис. 1).

Потім вирішується варіаційне рівняння поля швидкостей жорстко-пластичного середовища під час прокатки прямокутного профілю на гладкій бочці.

Варіаційне рівняння для поля швидкостей жорстко-пластичного середовища [9]:

$$\delta \left[\iiint_V \tau_s H dV + \iint_{S_{cr}} \tau_s [v] dS - \iint_{S_{\sigma}} \sigma_{n_i} v_i dS \right] = 0, \quad (1)$$

де δ – знак варіації;

V – обсяг осередку деформації;

τ_s – межа плинності за зсуву;

H – інтенсивність швидкості деформації зсуву;

S_{cr} – поверхня зрізу;

$[v]$ – стрибок швидкості на поверхні зрізу;

S_{σ} – поверхня контакту розкату, що прокатується, з валками;

σ_{n_i}, v_i – напруження та швидкість ковзання на поверхні деформованого твердого тіла.

Початок координат розташований у площині виходу розкату з валків. Вісь спрямована проти ходу прокатки. Кінематично можливе поле швидкостей в осередку деформації під час прокатки на гладкій бочці виводиться з умови, що тверде тіло не стисливе і на поверхні контакту виконується умова непроникності.

Рішення варіаційного рівняння (1) не може бути отримано аналітично через складний та нелінійний вид функціоналу. Тому для визначення істинного поля швидкостей використовується його властивість мінімальності. Варіаційне завдання зводиться до такого: серед усіх кінематично можливих полів швидкостей, що задовольняють заданим граничним умовам

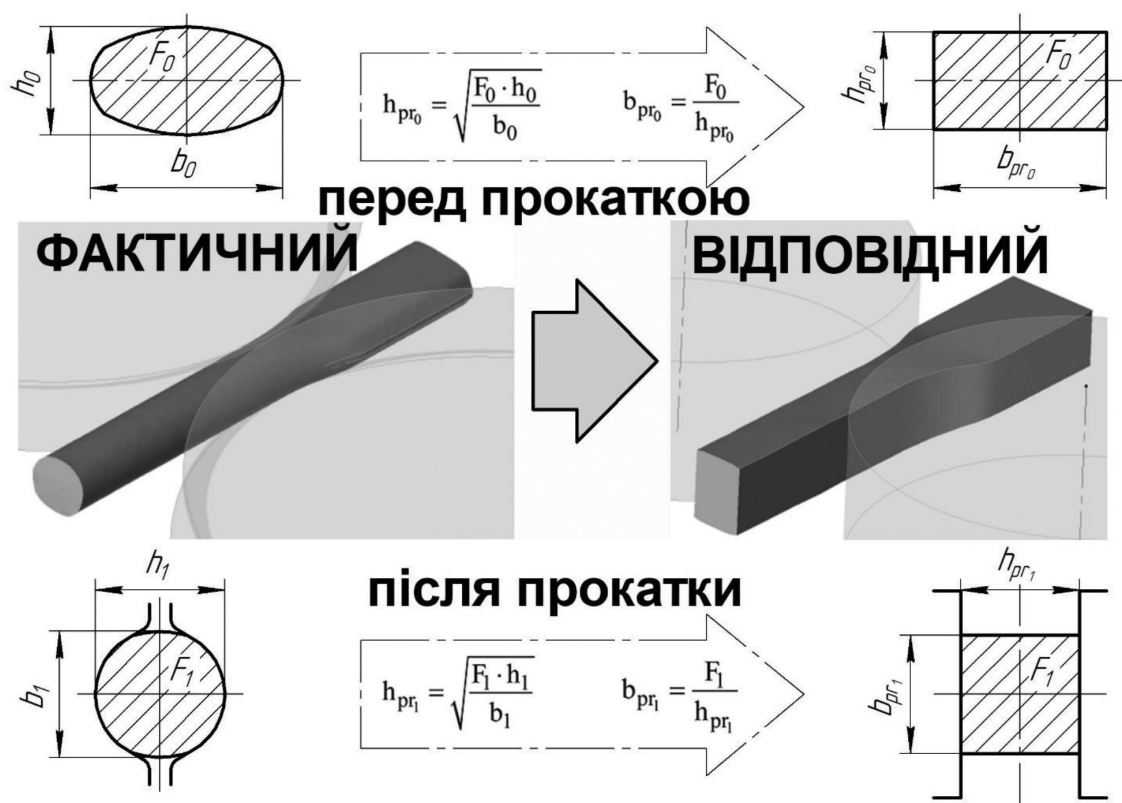


Рис. 1. Перетворення профілю заготовки і форми калібру на прямокутник за методом відповідної смуги

та умові нестискання, необхідно знайти поле, що реалізує мінімум функціоналу (1). У цьому функціоналі кожен член є компонентом повної потужності.

Мінімізація функціоналу здійснюється шляхом пошуку на сітці невідомих параметрів. Інтервали зміни:

$$\lambda = 1 \dots \frac{h_{p_{r_0}}}{h_{p_{r_1}}}; \quad a_1 = 1 \dots 1,15,$$

де $h_{p_{r_0}}$, $h_{p_{r_1}}$ – середня висота заготовки перед прокаткою та середня висота профілю після прокатки відповідно.

Для забезпечення умов безперервної прокатки деформаційні параметри для другого (наступного) проходу визначаються за аналогічною методикою, але з урахуванням силових впливів із боку першої кліті. Для цього спочатку вирішуємо варіаційну задачу для другого проходу за умови вільної прокатки. Далі обчислюють швидкість виходу металу після другого проходу:

$$v_{m_2} = a_2 \cdot v_{b_2},$$

де v_{m_2} – швидкість металу після другого проходу;

a_2 – коефіцієнт випередження для другого проходу;

v_{b_2} – середня кутова швидкість валків у другому проході.

Для визначення наявності стискаючих або розтягуючих напружень у розкаті між першою і другою клітями необхідно визначити швидкість входу металу в другий калібр для умов вільної прокатки:

$$v_{m_0} = \frac{v_{m_2}}{\lambda_2},$$

де λ_2 – коефіцієнт подовження у другому проході.

Далі порівнюються значення v_{m_1} та v_{m_0} . Якщо $v_{m_1} > v_{m_0}$, то в просторі між клітями виникає стискаюче напруження. Якщо швидкості рівні, то прокатка здійснюється без розтягуючих або стискаючих напружень між клітями. А якщо $v_{m_1} < v_{m_0}$, то в розкаті між клітями спостерігається розтягуюче напруження.

За наявності стискаючих напружень розміри профілю, що прокатується, не змінюються в просторі між клітями, оскільки відстань між клітями значно більше перерізу розкату. Тоді за умови $v_{m_1} \geq v_{m_0}$ розрахунки розмірів розкату та умов прокатки у третьому проході проводять із використанням описаного вище методу без урахування силових впливів із боку попередньої кліті. Для умов прокатки з розтягненням між

клітями необхідно визначити розміри заготовки для другого проходу безперервного прокатного стану, які зменшуються під дією розтягуючих напружень.

Для цього визначають величину подовження між клітями виходячи з різниці швидкостей:

$$\lambda_{mk_1} = \frac{v_{m_0}}{v_{m_1}}.$$

Умови деформації металу між клітями стану аналогічні процесу волочіння, коли профіль розтягується в поздовжньому напрямку й одночасно стискається з усіх інших боків. Для цього випадку справедлива залежність між ступенем деформації та коефіцієнтом подовження:

$$\varepsilon_{mk_1} = \frac{\lambda_{mk_1} - 1}{\lambda_{mk_1}}.$$

Уважаємо, що різниця швидкостей на вході в другу кліть і виході з першої рівномірно розподілена по простору між клітями. Звідси можна визначити середню швидкість деформації між клітями:

$$U_{mk_1} = \frac{v_{m_0} - v_{m_1}}{\ell_{mk_1}},$$

де ℓ_{mk_1} – відстань між осями валків першої та другої клітей.

Визначають розтягуюче напруження в просторі між першою і другою клітями. Оскільки середня швидкість деформації у просторі між клітями через велику відстань не перевищує 100 с^{-1} , то напруження можна розрахувати будь-яким відомим методом для розрахунку опору деформації за гарячої прокатки.

Зменшення розмірів заготовки, що надходить у другий осередок деформації, визначається:

$$h_{01}^t = h_{02} \cdot (1 - v \cdot \varepsilon_{mk_1}), \quad (3)$$

$$b_{01}^t = b_{02} \cdot (1 - v \cdot \varepsilon_{mk_1}), \quad (4)$$

де h_{02} , b_{02} – висота та ширина заготовки для другого проходу без урахування деформації між клітями; v – коефіцієнт Пуассона для сталі за температури прокатки.

Коефіцієнт Пуассона для гарячої сталі приймається рівним $v = 0,44$.

Після цього коефіцієнт розширення для заданих розмірів заготовки визначається відповідно до універсального варіаційного методу розрахунку деформації під час прокатки в калібрах системи «овал – круг». А ширина розкату після прокатки у другому проході визначається з урахуванням заднього натягнення. Така методика

розрахунку зберігається для наступних проходів безперервного стану.

У результаті отримуємо значення коефіцієнтів подовження з урахуванням натягнення прокату між клітями по всіх проходах. Далі, знаючи значення коефіцієнта витяжки, визначають площу профілю після прокатки за кожен прохід безперервного стану. Потім, знаючи значення площі профілю, обчислюють дійсну ширину прокату після прокатки. Дійсна ширина відповідає площі, обмеженої контуром калібру та лінією бічної поверхні поперечного перерізу прокату.

На рис. 2 та 3 представлено загальний вигляд головного вікна програми. За результатами розрахунку у графічному полі будується контур заготовки та калібру, заповненого металом.

Як видно з рис. 2 та 3, розроблена математична модель, незважаючи на спрощення, ураховує заповнення овальних та круглих калібрів клітей безперервного прокатного стану.

У статті розроблено універсальну математичну модель процесу безперервної прокатки в калібрах системи «овал – круг». Під час виведення математичної моделі використано варіаційні принципи механіки суцільних середовищ, що ґрунтуються на мінімальних властивостях дійсного поля швидкостей. Для забезпечення універсальності запропонованої моделі визначення формозміни металу в овальних та кругових калібрах пропонується замінити профіль заготовки еквівалентним прямокутним перерізом із використанням методу відповідної смуги. При цьому форма круглого або овального калібру замінюється на «гладку бочку» також за правилами методу відповідної смуги. Умови безперервної прокатки враховуються шляхом розрахунку наведених розмірів заготовки під дією розтягуючих сил між клітями прокатного стану. Заповнення калібру визначається зворотним перетворенням із відповідного прямокутного перерізу в область, обмежену контуром

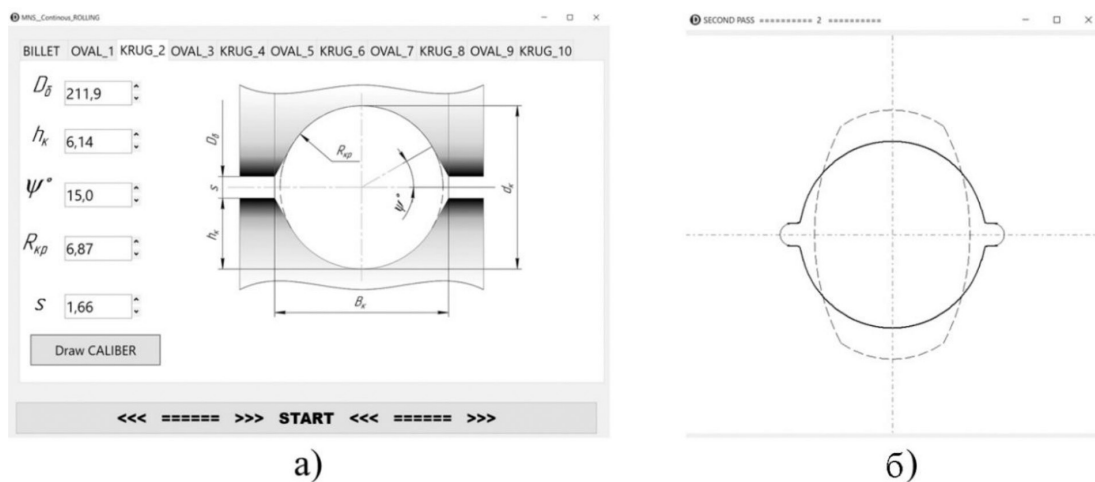


Рис. 2. Загальний вигляд головного вікна програми розрахунку і побудови круглих калібрів (а) та графічне подання результатів розрахунку (б)

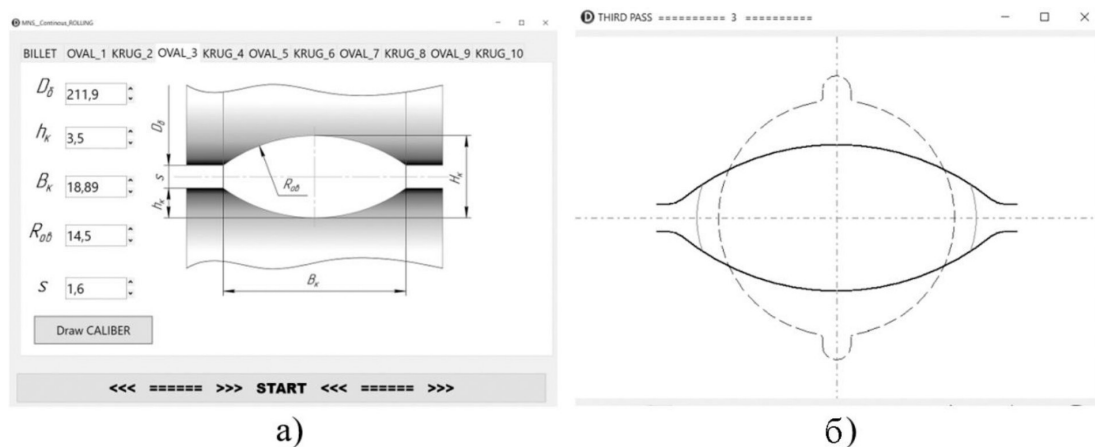


Рис. 3. Загальний вигляд головного вікна програми розрахунку та побудови овальних калібрів (а) та графічне подання результатів розрахунку (б)

калібру та лінією бічної поверхні, що описується радіусом.

На основі запропонованої універсальної математичної моделі процесу безперервної прокатки простих профілів в овальних та круглих калібрах розроблено програму для визначення зміни форми розкату під час прокатки у круглих та овальних калібрах з урахуванням форми профілю заготовки. У графічному вікні програми користувач може бачити фактичний контур заготовки та ступінь заповнення калібрів.

У результаті може бути вибрано оптимальний режим роботи стану без перепоповнення калібрів.

Розроблена математична модель може бути використана для дослідження формозміни металу за безперервної прокатки на сортових станах у системі калібрів «овал – круг». Дана модель також рекомендується до використання як розрахунковий модуль для визначення деформації металу під час прокатки у високошвидкісному проволочному блоці із загальним приводом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. World Investment Report 2017. Investment and the Digital Economy [Electronic resource]. Geneva: UNCTAD, 2017, 238 p. URL: http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/wir2017_en.pdf (accessed 22.06.2025).
2. Романов М. Цифрова трансформація виробничого підприємства. URL: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2017/06/30/цифровая-трансформация-производстве/> (дата звернення: 22.06.2025).
3. The WICON rolling simulation software – for billet, bar and rod mills. URL: <http://www.wicon.se/index.html> (accessed 22.06.2025).
4. Händemark M.: Improved roll pass design for long products with WICON. MILLENNIUM STEEL. 144–51 (2011).
5. Fabík, Richard & Kliber, Jiří & Mamuzic, Ilja & Kubina, Tomas & Aksenov, Sergey: Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (FEM). Metalurgija. Sisak then Zagreb. 51. 341–344 (2012).
6. Ganguly, Shouvik & Wang, Xin & Chandrashekhara, K. & Buchely, Mario & Lekakh, Simon & O'Malley, Ronald & Kumar, A. & Thapliyal, Vivek: Modeling and simulation of mass flow during hot rolling low carbon steel I-beam. *Journal of Manufacturing Processes*. 64. 285–293 (2021). DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.023
7. Biba, Nikolay: Integration of automated roll pass design and simulation for the development of shape rolling technology. 758–767 (2024). DOI: 10.21741/9781644903254-81
8. Солод В. С., Бенецький А. Г., Мамаєв А. Н. Моделювання процесу прокатки профілів із використанням програмного комплексу «Sort-pro». Обробка матеріалів тиском. *Збірник наукових праць Донбаської державної машинобудівної академії*. 2010. № 3(24). С. 60–63. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/article/10SVSPCS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/article/10SVSPCS.pdf) (дата звернення: 22.06.2025).

REFERENCES:

1. World Investment Report 2017. Investment and the Digital Economy. Geneva: UNCTAD, 2017, 238 p. Retrieved from: http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/wir2017_en.pdf (accessed 22.06.2025).
2. Romanov, M. Tsyfrova transformatsiia vyrobnychoho pidpriemstva. Retrieved from: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2017/06/30/цифровая-трансформация-производстве/> (accessed 22.06.2025).
3. The WICON rolling simulation software – for billet, bar and rod mills. Retrieved from: <http://www.wicon.se/index.html> (accessed 22.06.2025).
4. Händemark M.: Improved roll pass design for long products with WICON. MILLENNIUM STEEL. 144–151 (2011).
5. Fabík, Richard & Kliber, Jiří & Mamuzic, Ilja & Kubina, Tomas & Aksenov, Sergey: Mathematical modelling of flat and long hot rolling based on finite element methods (FEM). Metalurgija. Sisak then Zagreb. 51. 341–344 (2012).
6. Ganguly, Shouvik & Wang, Xin & Chandrashekhara, K. & Buchely, Mario & Lekakh, Simon & O'Malley, Ronald & Kumar, A. & Thapliyal, Vivek: Modeling and simulation of mass flow during hot rolling low carbon steel I-beam. *Journal of Manufacturing Processes*. 64. 285–293 (2021). DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.023
7. Biba, Nikolay: Integration of automated roll pass design and simulation for the development of shape rolling technology. 758–767 (2024). DOI: 10.21741/9781644903254-81
8. Solod, V. S., Benetsky, A. G., Mamaev, A. N. Modeling of the process of rolling of sections using the software package “Sort-pro”. Materials working by pressure. Collection of scientific works Donbass State Engineering Academy. 3 (24). 60–63 (2010). Retrieved from: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/article/10SVSPCS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/article/10SVSPCS.pdf) (accessed 22.06.2025).