

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.771.23

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-23>

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОБТИСНЕНЬ В ЕДЖЕРНИХ ВАЛКАХ

Грибков Едуард Петрович,

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-1565-6294

Доброносів Юрій Костянтинович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0001-9608-3386

Каленков Олександр Федорович,

здобувач вищої освіти

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Бутурлін Олег Сергійович,

здобувач вищої освіти

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Прокатка в еджерних валках дозволяє отримати листовий прокат із правильною формою поперечного перерізу по бічних кромках, що дозволяє знизити бічну обрізь і підвищити вихід придатного. Розроблена 2D-модель на основі скінченно-елементного методу і регресійна модель на основі її результатів реалізації дозволяє визначити енергосилові параметри процесу. Регресійні моделі побудовані на основі отриманих залежностей коефіцієнта напруженого стану та коефіцієнта плеча від питомого показника з відношення довжини осередку деформації до середньої товщини прокату. Але наявність конічної форми бочки валків робить ці результати придатними тільки для проєктних робіт зі створення обладнання. У цьому випадку доцільним є аналіз на основі 3D-моделей. Аналіз напружено-деформованого стану під час прокатки в конічних валках показав нерівномірність деформації по товщині листа. Тобто стає питання про величину обтиснення, яка необхідна для розв'язання двомірної задачі. Середнє значення ступеня деформації не дає реальної картини в цьому випадку. Однак і ця модель має недолік, який пов'язаний з припущенням про прямокутну форму заготовки, що не відповідає дійсності за багатопрохідної схеми. Доцільним також є створення моделей, що враховують прокатку листа в горизонтальних валках до і після прокатки в еджерних валках. Увігнутість кромки після прокатки в горизонтальних клітках може сягати значної величини, наявність дефекту «собача кістка» також впливає на бічну кромку після прокатки в горизонтальних валках. У ролі прикладу було проаналізовано прокатку листа товщиною 300 мм до 95 мм, шириною 1000 мм. Увігнутість кромки після 5-го проходу становила 17 мм, висота собачої кістки після прокатки у вертикальній клітці – 18,5 мм, увігнутість кромки після 13-го проходу – 0,73 мм. Тобто двомірна модель дає можливість швидко знайти режими обтиснень, тривимірна модель надає уявлення про напружено-деформований стан, а комплексне рішення з аналізом прокатки в горизонтальних валках надає можливість визначити раціональні режими прокатки і визначити геометричну форму прокату після прокатки.

Ключові слова: листовая прокатка, еджерні валки, режими обтиснень, формоутворення прокату, бічна кромка, математична модель, автоматизоване проєктування, CAE-система.

Gribkov Eduard, Dobronosov Yuri, Kalenkov Olexander, Buturlin Oleg. Automated design of rolling modes in edger rolls

Rolling in edger rolls makes it possible to produce rolled plates with the correct cross-sectional shape along the side edges, which reduces the side cut and increases the yield of usable products. The developed 2D model based on the finite element method and the regression model based on its implementation results allow us to determine the energy and power parameters of the process. The regression models were built on the basis of the obtained

dependences of the stress state coefficient and the shoulder coefficient on the specific ratio of the deformation center length to the average thickness of the slab. However, the conical shape of the work roll makes these results suitable only for design work on the creation of equipment. In this case, an analysis based on 3D models is appropriate. The analysis of the stress-strain state during rolling in edger rolls showed uneven deformation along the thickness of the sheet. This raises the question of the deformation strain required to solve a two-dimensional model. The average value of the deformation strain does not give a realistic picture in this case. However, this model also has a drawback, which is associated with the assumption of a rectangular workpiece shape, which is not true in a multi-pass scheme. It is also advisable to create models that take into account the rolling of the sheet in horizontal rolls before and after rolling in edger rolls. The concavity of the edges after rolling in horizontal stands can reach a significant value, and the presence of a dogbone defect also affects the side edge after rolling in horizontal rolls. As an example, we analysed the rolling of a 300 mm thick sheet to 95 mm and 1000 mm wide. The edge concavity after the 5th pass was 17 mm, the dogbone height after rolling in a vertical stand was 18.5 mm, and the edge concavity after the 13th pass was 0.73 mm. In summary, the two-dimensional model allows us to quickly find the deformation modes, the three-dimensional model provides an understanding of the stress-strain state, and the integrated solution with the analysis of rolling in horizontal rolls makes it possible to determine the rational rolling modes and determine the geometric shape of the plate after rolling.

Keywords: sheet rolling, edger rolls, crimping modes, rolled products shaping, side edge, mathematical model, computer-aided design, CAE system.

Вступ. Еджерні валки є невід'ємною частиною сучасних листопрокатних клітей. Обтиснення по бічних кромках дозволяє покращити геометрію поперечного перерізу прокату і знизити бічну обрізь. Формоутворення за вертикальної прокатки досить повно вивчено [1; 2] і дозволяє визначити розміри стовщення прокату в зоні деформації. Також В. Ф. Потапкіним та І. О. Бобухом розроблено математичні моделі для визначення енергосилових параметрів процесу. Але всі відомі роботи основані на використанні графаналітичних методів і мають точність, що не відповідає сучасним вимогам з технології. Також у роботах не враховується деформація металу, а точніше – форма прокату після прокатки в горизонтальних валках, що також вносить неточності в розрахунок. Недостатня точність розрахунку і неможливість урахування попередньої деформації робить актуальним подальше дослідження прокатки в еджерних валках, зокрема на основі скінченно-елементних моделей [3–5].

Метою роботи є визначення впливу величини обтиснення на енергосилові параметри процесу прокатки листового металопрокату на основі регресійних моделей, отриманих на результатах скінченно-елементного моделювання.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та розв'язано такі завдання: створити двовимірну модель процесу прокатки листового прокату на основі використання методу скінченних елементів; на основі реалізації розробленої скінченно-елементної моделі встановити вплив обтиснення на енергосилові параметри процесу прокатки; на основі отриманих результатів скінченно-елементної моделі розробити регресійну модель.

Результати. Як приклад реалізації розробленої математичної моделі було розглянуто

прокатку в еджерних (вертикальних) валках діаметром 800 мм листів шириною 1550 мм та товщиною 100 мм. Обтиснення варіювали від 4 мм до 12 мм. Поля розподілів еквівалентних напружень показано на рис. 1.

З отриманих полів було вибрано значення нормальних контактних, нормальних та нормальних дотичних напружень. Нормальні контактні та нормальні напруження потрібні були для визначення механічних властивостей матеріалу під час прокатки. Розподіл дотичних контактних напружень потрібен для визначення за зміною їх знаку координати нейтрального перерізу для отримання величини моменту прокатки. Силу та момент прокатки визначали за середнім значенням по часу реакції довідкової точки (центр обертання) валка.

Отримані результати залежності коефіцієнта напруженого стану та коефіцієнта плеча залежно від питомого показника з відношення довжини осередку деформації до середньої товщини прокату (L/h_{cp}) представлені на рис. 2. Там же наведено отримані поліноміальні описи даних залежностей, які можна використовувати в моделюванні процесів прокатки в еджерних валках.

Отримані результати підтверджують достатню достовірність отриманих регресійних залежностей та її можливість використання під час розроблення інженерних моделей процесів прокатки в еджерних валках, що дозволить реалізацію автоматизованого проєктування режимів прокатки в режимі «реального часу» як на діючому обладнанні, так й під час проєктування нового.

З огляду на прийняті припущення ця модель має недоліки під час використання валків із конічною бочкою, оскільки деформація в цьому випадку буде нерівномірною по товщині

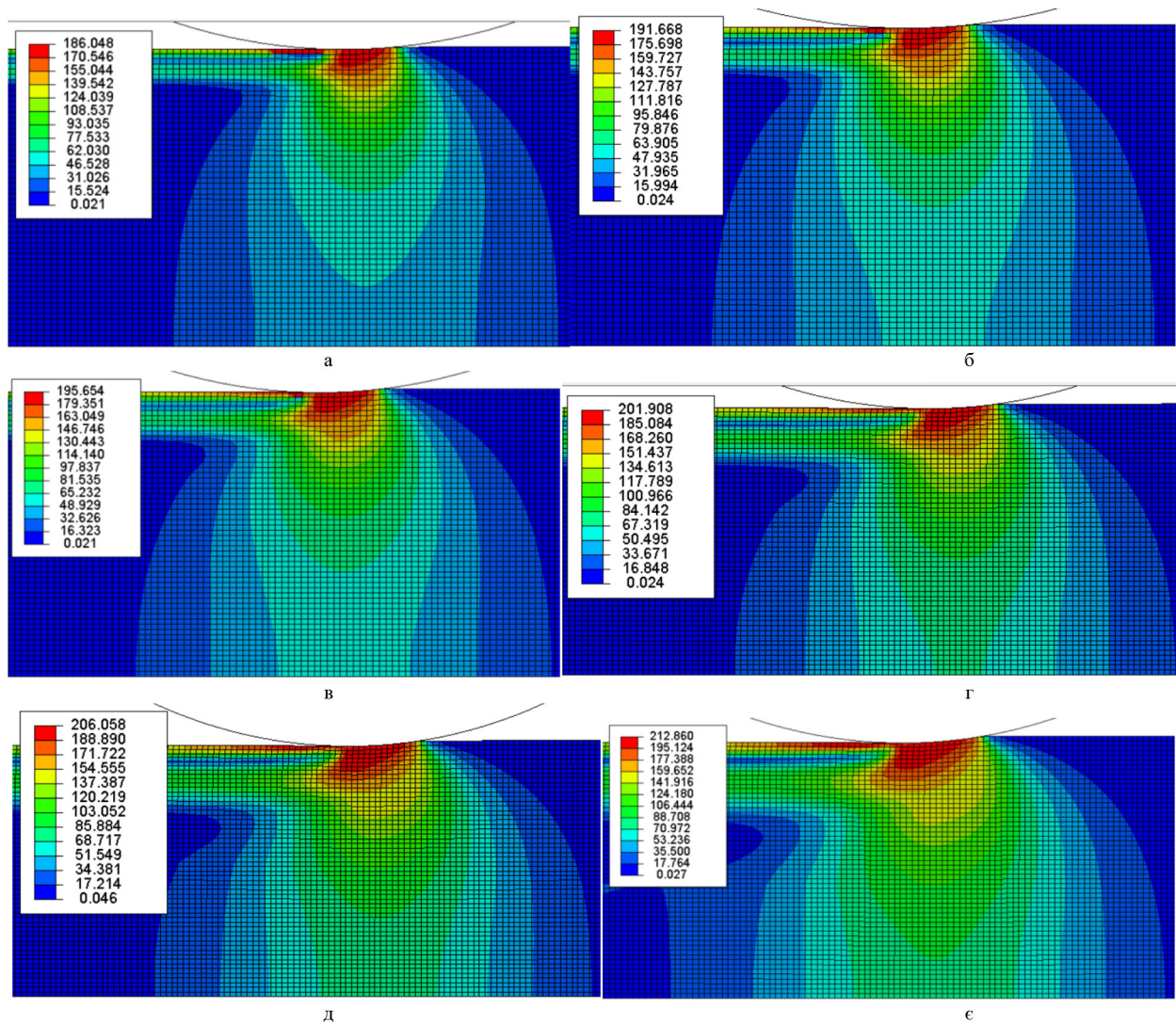


Рис. 1. Поля розподілів еквівалентних напружень за різних обтиснень:
а – 4 мм; б – 5 мм; в – 6 мм; г – 8 мм; д – 10 мм; е – 12 мм

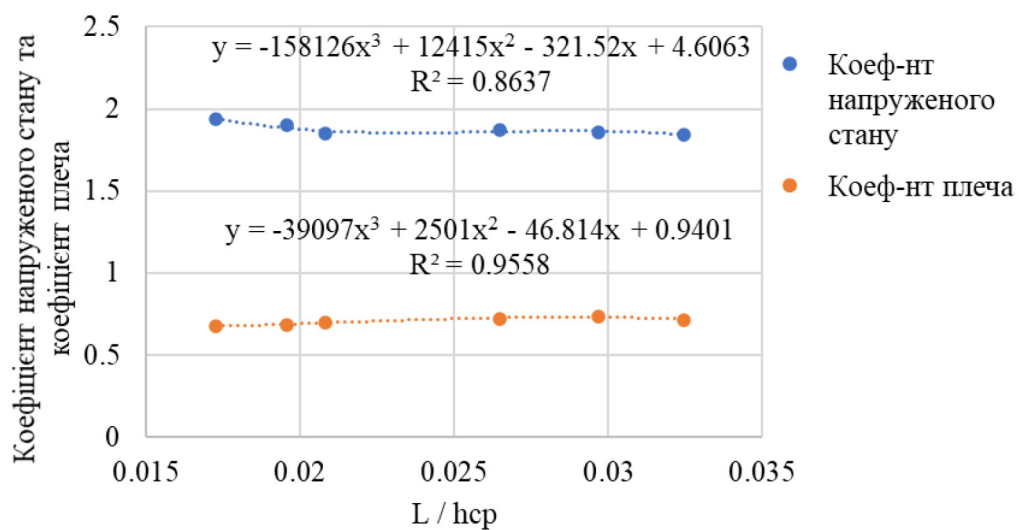


Рис. 2. Залежності коефіцієнта напруженого стану та коефіцієнта плеча залежно від питомого показника з відношення довжини осередку деформації до середньої товщини прокату (L/h_{cp})

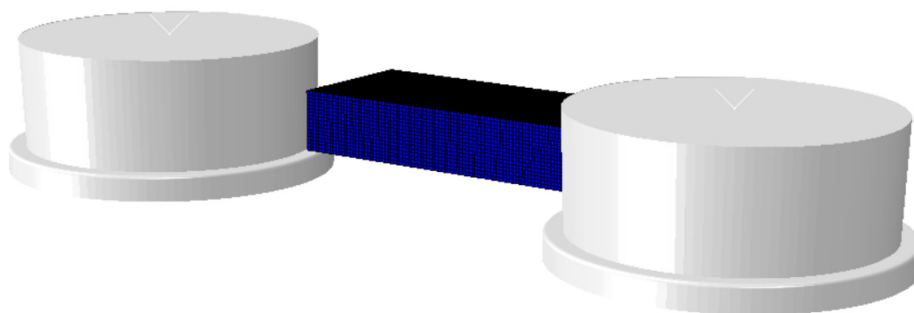


Рис. 3. Розрахункова схема 3D-моделі прокатки в еджерних валках

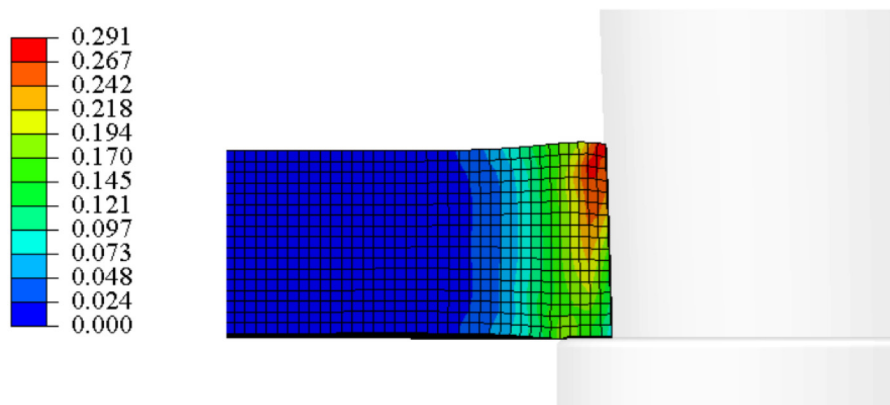


Рис. 4. Результати розрахунку на основі 3D-моделі прокатки в еджерних валках (поле еквівалентної пластичної деформації)

прокату. У цьому випадку доцільно використовувати тривимірну модель, схему якої представлено на рис. 3.

Аналіз результатів розрахунку показує нерівномірність деформації (рис. 4) по товщині прокату, а також наявність дефекту «собака кістка» [1], що потрібно враховувати, визначаючи енергосилові параметри процесу.

Однак і ця модель має недолік, який пов'язаний з припущенням про прямокутну форму заготовку, що не відповідає дійсності за багатопрхідної схеми. Для цього потрібно враховувати прокатку в горизонтальних валках.

На рис. 5 представлено розрахункову схему 3D-моделі прокатки на стані з еджерними валками.

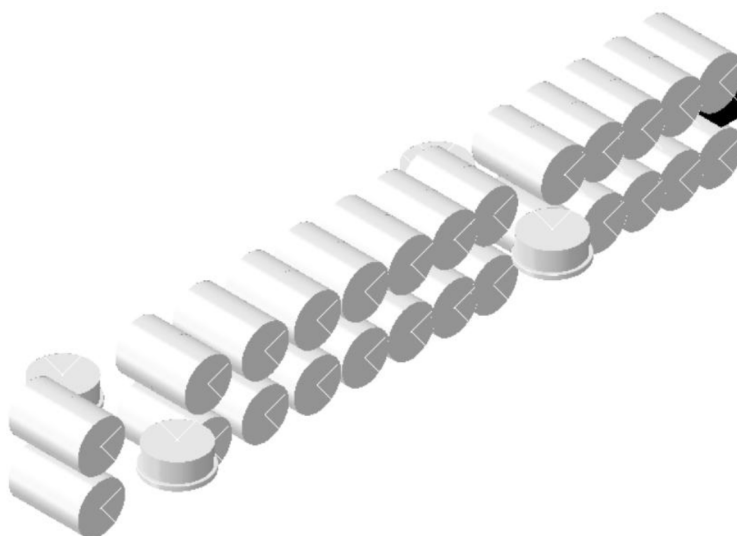


Рис. 5. Розрахункова схема 3D-моделі прокатки на стані з еджерними валками

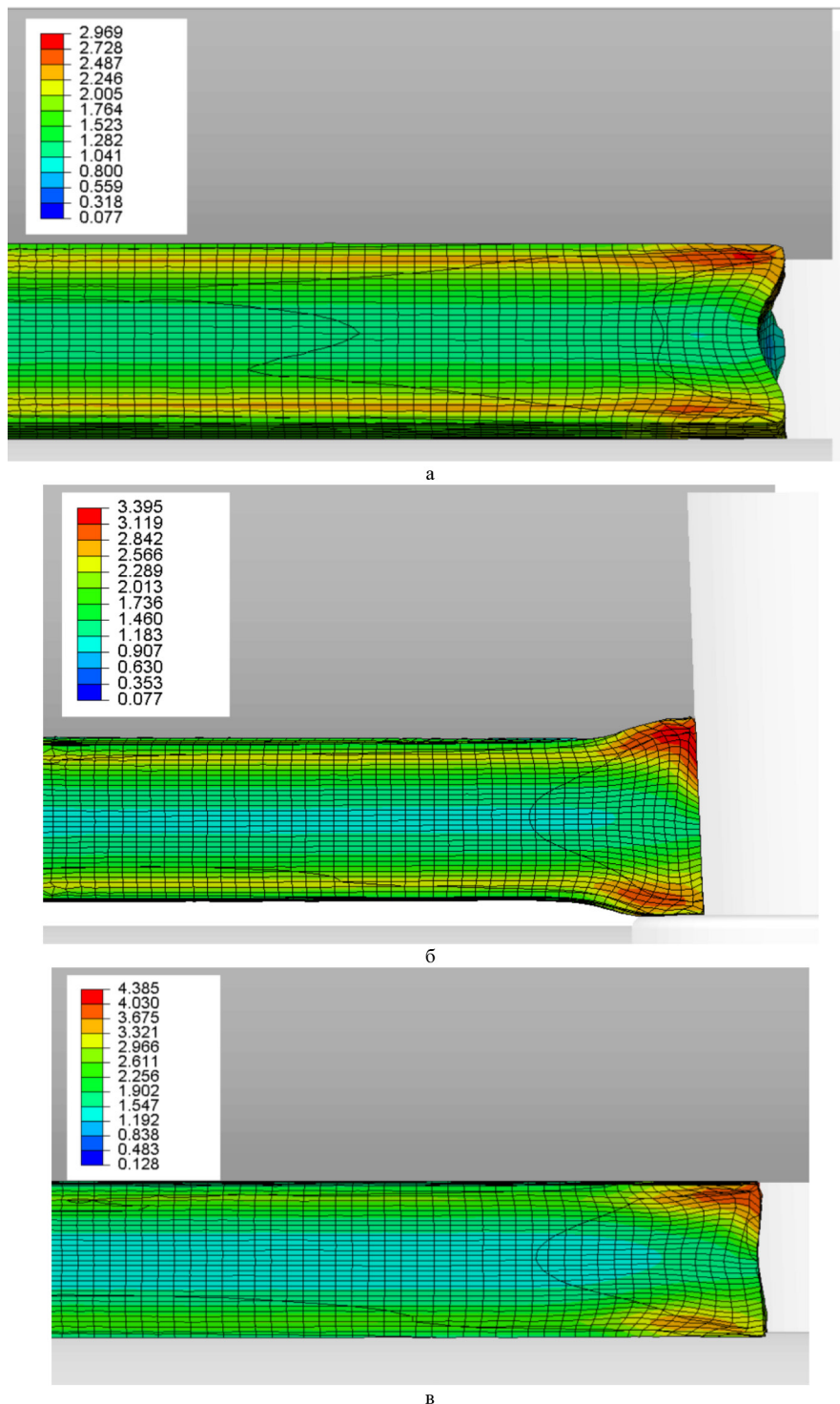


Рис. 6. Форма перерізу заготовки та поля розподілу еквівалентних пластичних деформацій після прокатки в горизонтальних валках (а), після прокатки у вертикальних валках (б) та після калібруючої прокатки в горизонтальних валках (в)

Форма поперечного перерізу після прокатки має С-подібну форму по бічних краяхах (рис. 6), що дуже сильно впливає на напружено-деформований стан під час прокатки у вертикальних валках, а дефект «собача кістка» впливає на розподіл деформацій за подальшої прокатки в горизонтальній кліті.

Як приклад було проаналізовано прокатку листа товщиною 300 мм до 95 мм, шириною 1000 мм. Увігнутість кромки після 5-го проходу становила 17 мм, висота «собачої кістки» після прокатки у вертикальній кліті – 18,5 мм, увігнутість кромки після 13-го проходу – 0,73 мм.

Висновки. Розроблені скінченно-елементні моделі процесу прокатки в еджерних валках мають різну складність: двовимірний модель має невеликий час розрахунку і доцільна для використання в прокатці у валках із гладкою бочкою; тривимірний модель дає найбільш повну картину і потребує врахування форми поперечного

перерізу вхідної заготовки для більш точного прогнозу напружено-деформованого стану. Дефекти форми бічної кромки можуть сягати великих величин, і для отримання якісної кромки їх потрібно враховувати для визначення обтиснень в еджерних валках, також потрібно аналізувати подальші проходи для більш точного прогнозу форми листа.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ginzburg V. B., Ballas R. Flat rolling fundamentals. CRC Press, 2000. 850 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482277357>
2. Liu Y. M., Hao P. J., Wang T. et al. Mathematical model for vertical rolling deformation based on energy method. *Int J Adv Manuf Technol*. 2020. 107. P. 875–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05094-3>
3. Shangwu Xiong, Rodrigues J.M.C., Martins P.A.F. Three-dimensional modelling of the vertical–horizontal rolling process. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2003. Vol. 39, Issue 11. P. 1023–1037. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00154-3](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00154-3)
4. Forouzan M. R., Salehi I., Adibi-sedeh A. H. A comparative study of slab deformation under heavy width reduction by sizing press and vertical rolling using FE analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209, Issue 2. P. 728–736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.063>
5. Yu H., Liu X., Zhao X., Kusaba Y. FEM analysis for V–H rolling process by updating geometric method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 180, Issues 1–3. P. 323–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.07.012>

REFERENCES:

1. Ginzburg, V. B., & Ballas, R. (2000). Flat rolling fundamentals. CRC Press, 850 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482277357>
2. Liu, Y. M., Hao, P. J., Wang, T. et al. (2020). Mathematical model for vertical rolling deformation based on energy method. *Int J Adv Manuf Technol*, 107, 875–883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05094-3>
3. Shangwu Xiong, Rodrigues J. M. C., Martins P. A. F. (2003). Three-dimensional modelling of the vertical–horizontal rolling process. *Finite Elements in Analysis and Design*, 9(11), 1023–1037. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00154-3](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00154-3)
4. Forouzan, M. R., Salehi, I., & Adibi-sedeh, A. H. (2009). A comparative study of slab deformation under heavy width reduction by sizing press and vertical rolling using FE analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 728–736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.063>
5. Yu, H., Liu, X., Zhao, X., & Kusaba, Y. (2006). FEM analysis for V–H rolling process by updating geometric method. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1–3), 323–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.07.012>