

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.14

УДК 621.771.074

Самохвал В.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0585-7225 email: volsamokhval@gmail.com

Васильєв О.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,
e-mail: vaasilieeva@gmail.com

Концедал Р.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти

Локтев Б.С., здобувач другого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
e-mail: doroyckbld@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Samokhval Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy,

Vasyliiev Oleksandr, Postgraduate Student

Kontsedal Roman, Postgraduate Student

Loktev Bohdan, Master's Degree Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ДІАМЕТРІВ ВАЛКІВ ПРУТКОВИХ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

Метою роботи є оцінка значимості критерію технологічної ефективності для вибору діаметру валків та розробка рекомендацій щодо призначення діаметрів валків пруткових станів. З аналізу даних про діаметри валків та технологічні параметри прокатування існуючих пруткових станів встановлено, що основними критеріями вибору діаметру валків є умови захвату, міцність та зносостійкість. Запропоновано доповнити цей перелік критерієм технологічної ефективності, який визначається як відношення коефіцієнтів видовження та розширення. Рекомендовано значення відношення діаметрів валків до початкової товщини розкату для попереднього призначення діаметрів валків по групах клітей пруткових станів.

Ключові слова: діаметр валків, прутковий прокатний стан, коефіцієнт видовження, розширення, початкова товщина розкату.

The purpose of the work is to evaluate the significant of the technological efficiency criterion for choosing the diameter of the rolls and to develop recommendations for the designation of the diameters of the rolls of bar mills. From the analysis of data on roll diameters and rolling technological parameters of existing bar mills, it was established that the main criteria for choosing the roll diameter are bite conditions, strength and wear resistance. It is proposed to supplement this list with a technological efficiency criterion, which is defined as the ratio of elongation and spreading coefficients. The value of the ratio of the diameters of the rolls to the initial rolling thickness is recommended for the preliminary assignment of the diameters of the rolls by groups of stands of bar mills.

Keywords: diameter of rolls, bar rolling mill, coefficient of elongation, spreading, initial thickness workpiece.

Постановка проблеми

В галузі виробництва довгомірного прокату виділяють окрему групу станів, які спеціалізуються на виготовленні профілів простої форми. Такі стани називають прутковими (bar mill). Характерними відмінностями типових пруткових станів є: послідовне розташування клітей, що забезпечує неперервний процес прокатування і відповідну продуктивність; чергування горизонтальних та вертикальних клітей, для забезпечення отримання симетричного перерізу та виключення кантування розкату; розміщення клітей у кількох групах, розділених летючими обрізними ножицями; видача готового профілю на рейковий холодильник з послідуочим розрізанням на мірну довжину.

Провідні постачальники прокатного обладнання забезпечують комплексне постачання досить широкого спектру технологічного обладнання та сервісів, в залежності від вимог спо-

живачів [1—3]. Зокрема, для пруткових станів використовують робочі кліті переважно безстанинного типу. Також знаходять застосування робочі кліті традиційної конструкції та консольні [4]. Незважаючи на різноманітність конструктивних рішень для робочих клітей, діаметри валків пруткових станів змінюється у межах від 280 до 650 мм [5]. Зазвичай на станах використовують від 3 до 5 типорозмірів валків. В залежності від особливостей технології, діаметри валків різних станів можуть суттєво відрізнятись, навіть для одних і тих самих груп клітей. Зважаючи на значний вплив параметрів валків на техніко-економічні показники роботи прокатних станів, задача обґрунтованого вибору діаметру валків зберігає свою актуальність і має суттєве практичне значення при проєктуванні нових прокатних станів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В технічній літературі досить поширені рекомендації з вибору матеріалу валків станів довгомірного прокату [6]. Стосовно вибору розмірів валків наводяться загальні рекомендації, наприклад, «вибір розміру стану в основному базується на принципі ... максимального обтиснення за умов легкого захвату» [7]. В навчальному посібнику [8] зазначено, що «діаметр валків визначають з умов допустимого кута захвату металу». Для пруткових станів, які в посібнику названо «сортовими», допустимі кути захвату становлять 16—18°. Виходячи з відомих умов захвату металу «кут захвату α не перевищує кута тертя β », приходимо до висновку, що діаметр валків рекомендується визначати для коефіцієнту тертя при захваті від 0,27 до 0,31.

Отже, основним критерієм для визначення діаметру валків слугують умови захвату металу валками. Другим визначальним критерієм вибору діаметру валків, за даними [8], є забезпечення міцності і жорсткості. Обидва зазначені критерії суттєво залежать від матеріалу валків.

У роботі [5] показано, що для чорнових клітей діаметр валків визначається переважно умовами захвату, а для чистових клітей домінуючим чинником стає зносостійкість валків. Отже, зносостійкість матеріалу валків можна використовувати в якості одного з критеріїв вибору діаметру.

У дослідженні [9], на прикладі процесу плющення круглого сталевго дроту діаметром 13 мм до товщини 9,1 мм, виконано моделювання впливу діаметру валків на параметри деформації. В дослідженнях використано досить широкий діапазон зміни діаметрів валків: 150, 400, 800 та 1600 мм. Доведено, що зі збільшенням діаметру валків зростає ширина контактування валків з розкатом та загальна ширина розкату. Найбільш інтенсивно таке зростання спостерігається для валків діаметром до 400 мм. Також наочно показана значна нерівномірність деформації для процесу плющення. Деформація по висоті не проникає в осьову зону розкату і зосереджується переважно в периферійних зонах. Поперечна деформація (розширення), навпаки, має максимальні значення по осі розкату, а на периферії — мінімальні значення. Це призводить до суттєвого зменшення поздовжньої деформації по мірі зростання діаметру валків. Відмічена порівняно рівномірна поздовжня деформація для процесу плющення. Для валків малого діаметру така деформація має максимальні значення, а по мірі збільшення діаметру валків ця деформація зменшується. За результатами досліджень зроблено висновки, що на розподіл поперечної та поздовжньої деформацій впливає переважно довжина осередку деформації, яка в даному дослідженні визначається лише діаметром валків.

Узагальнюючи результати роботи [9], можемо стверджувати, що до основних критеріїв вибору діаметру валків слід віднести технологічну ефективність. Такий критерій відображає вплив діаметру валків на параметри формозміни металу. Для пруткових станів технологічна ефективність можна оцінити за відношенням видовження та розширення. Якщо видовження перевищує розширення, такий процес може вважатися ефективним, тому, що досягається основна мета — зменшення площі поперечного перерізу розкату. В іншому випадку, коли розширення перевищує видовження, виникає потреба у здійсненні додаткової роботи деформації для усунення такого збільшеного, але технологічно необґрунтованого, розширення. Отже, використання критерію технологічної ефективності для вибору діаметру валків пруткових станів дозволить не тільки підвищити ефективність використання валків, але й технології прокатування загалом. Для підтвердження можливості використання критерію технологічної ефективності для вибору діаметру валків необхідно дослідити його значимість та взаємодію з іншими критеріями.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз критеріїв вибору діаметрів валків, оцінка значимості критерію технологічної ефективності та розробка рекомендацій щодо призначення діаметрів валків пруткових станів.

Для досягнення представленої мети в роботі вирішуються задачі: аналізу відповідності діаметрів валків існуючих станів основним критеріям вибору; оцінка можливостей використання такого критерію як технологічна ефективність.

Виклад основного матеріалу

З аналізу публікацій слідує, що основними критеріями вибору діаметрів валків для пруткових станів є: умови захвату; умови міцності та жорсткості; умови забезпечення певної зносостійкості; технологічна ефективність. При цьому, для всіх пруткових станів характерно зменшення діаметру валків від чорнових до чистових клітей по мірі зменшення площі перерізу розкату.

Виконаємо аналіз відповідності діаметрів валків існуючих пруткових станів критерію умов захвату.

Вищенаведені умови захвату за посібником [8], можемо представити співвідношенням

$$\alpha_b \leq \beta . \quad (1)$$

Використовуючи відому залежність для визначення кута захвату, можемо визначити діаметр валків для граничних умов захвату

$$D_c = \frac{2 \cdot \Delta h}{f^2}, \quad (2)$$

де Δh — абсолютне обтиснення; f — коефіцієнт тертя.

Припускаючи, що середнє відносне обтиснення за прохід становить близько 30 %, або 0,3, визначимо абсолютне обтиснення через початкову товщину розкату $\Delta h \approx 0,3 \cdot h_0$.

Значення коефіцієнту тертя приймаємо в залежності від швидкості прокатування. Для чорнових клітей, в яких швидкість прокатування не перевищує 0,5 м/с, коефіцієнт тертя становить близько 0,4. Відповідно з виразу (2), отримаємо

$$D_{cr} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot h_0}{0,4^2} = 3,75 \cdot h_0. \quad (3)$$

Отже для першої кліті стану за умови використання квадратної заготовки зі стороною 160 мм, діаметр валків повинен становити не менше 600 мм.

По мірі збільшення швидкості прокатування коефіцієнт тертя буде зменшуватись. Наприклад, для швидкостей від 0,5 до 2 м/с, які мають місце в клітях проміжних груп, коефіцієнт тертя може бути прийнятий 0,3, а для клітей чистових груп, де швидкості перевищують 2 м/с, це значення зменшується до 0,25. Для цих значень коефіцієнту тертя з виразу (2) отримаємо, відповідно, $D_{cm} = 6,67 \cdot h_0$ та $D_{cf} = 9,6 \cdot h_0$.

Для проміжних груп типова товщина підкату становить близько 70 мм. Відповідно діаметр валків таких груп повинен становити близько $D_{cm} \approx 460$ мм. Аналогічно, за типової товщини підкату чистових груп у 30 мм, отримаємо $D_{cf} \approx 288$ мм.

Значення діаметрів валків, розраховані з умов захвату металу, відповідають типовим значенням діаметрів чорнових та проміжних груп клітей існуючих станів. Для клітей чистових груп розраховані діаметри дещо менші за існуючі. Наприклад, на стані 400/200 перша кліть чистової групи має валки діаметром 450 мм, а інші п'ять клітей — 380 мм. Тобто, для таких діаметрів валків умови захвату виконуються зі значним запасом.

Щодо інших критеріїв зауважимо, що зважаючи на зменшення розмірів розкатів в чистових клітях, умови міцності елементів валків будуть виконуватись, як для існуючих, так і для розрахованих діаметрів валків. Але така узагальнена оцінка повинна бути підтверджена розрахунками на міцність. Зносостійкість валків визначається переважно матеріалом валків, і зі збільшенням діаметру зносостійкість зростає.

Для оцінки діаметрів валків чистових груп за критерієм технологічної ефективності виконаємо аналіз параметрів формозміни для умов чистової групи стану 400/200. В першу кліть чистової групи надходить підкат діаметром 31 мм, на виході з кліті отримують овальний розкат з розмірами по осям симетрії 21,3х37,5 мм. Коефіцієнт видовження становить 1,2026, а коефіцієнт розширення — 1,1952. Так як видовження перевищує розширення, діаметр валків цієї кліті відповідає критерію технологічної ефективності. Тобто, діаметр валків першої кліті чистової групи у 450 мм за наведених технологічних параметрів є цілком прийнятним. Очевидно, що діаметр валків може бути зменшений з забезпеченням відповідних технологічних параметрів деформації.

В п'ятій кліті чистової групи, яка має діаметр 380 мм, здійснюється прокатування підкату діаметром 21 мм у овальний розкат розмірами 12,6х27,9 мм. Коефіцієнт видовження становить 1,2839, а коефіцієнт розширення — 1,3286. Перевищення розширення над видовженням свідчить про невідповідність діаметру валків критерію технологічної ефективності. Для забезпечення відповідності цьому критерію бажано зменшити діаметр валків, що дозволить зменшити розширення з одночасним збільшенням видовження.

Для обґрунтованого вибору діаметру валків за критерієм технологічної ефективності виконали оціночні розрахунки параметрів формозміни для валків різних діаметрів за незмінних розмірів підкату і калібру. Розрахунки розширення виконували для еквівалентного розкату з використанням залежності Зібеля. Результати розрахунків параметрів формозміни, а саме коефіцієнтів видовження та розширення, для валків діаметром 230, 280, 330, 380 та 430 мм показані на рис. 1. Зі збільшенням діаметру валків збільшується розширення, як абсолютне так і коефіцієнт, що, за незмінних розмірів підкату та деформації по висоті, призводить до пропорційного зменшення коефіцієнту видовження. Відповідно до зменшення коефіцієнту видовження за прохід, зменшується площа поперечного перерізу розкату, що свідчить про неефективність технології з такими параметрами. Результати розрахунків показують, що технологічна ефективність може бути забезпечена при використанні валків діаметром 320 мм і менше.

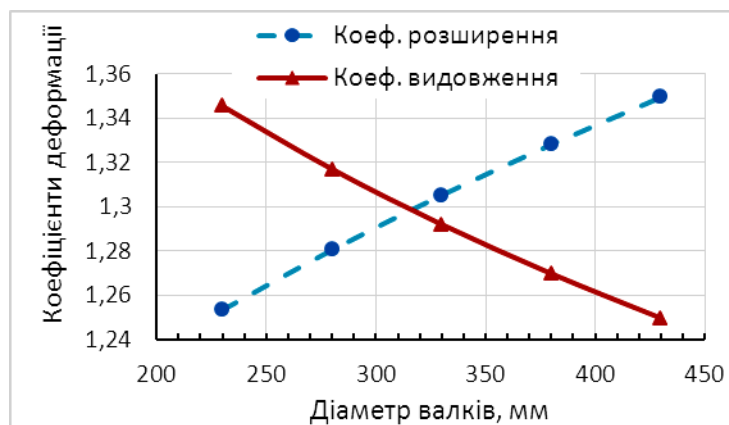


Рис. 1. Залежність параметрів формозміни від діаметру валків клітей чистової групи

Можливість використання критерію технологічної ефективності для вибору діаметрів валків, зокрема чистових груп клітей пруткових станів, підтверджується практичними даними. Наприклад, в роботі [10] наводиться опис прутково-дротового стану, чистова група якого оснащена безстанинними клітями з валками діаметром саме 320 мм.

Отже, для чистових груп клітей діаметри валків можна обирати в діапазоні від 280 мм (згідно критерію умов захвату) до 320 мм (згідно критерію технологічної ефективності).

Пропонований критерій визначається за параметрами розробленої технології, існуючої або проектної. Відповідно, він може використовуватись, як для аналізу технології для наявних діаметрів валків, так і для призначення діаметрів валків за бажаними технологічними параметрами, зокрема для певних розмірів розкатів. В останньому випадку виникає потреба у застосу-

ванні ітераційного підходу, тобто попередньо призначаються діаметри валків, для цих значень розраховуються технологічні параметри, які використовують для визначення оптимальних діаметрів валків по клітям окремих груп. Попереднє призначення діаметрів валків може бути здійснене за аналогією з існуючими станами, або з використанням оптимальних конструктивно-технологічних параметрів. Одним з таких параметрів є відношення діаметру валків до початкової товщини розкату D_c/h_0 .

Оптимальність відношення D_c/h_0 включає узгодженість критерію технологічної ефективності з іншими критеріями вибору діаметрів валків. Наприклад, для вищенаведених розрахунків за умови використання в першій кліті чистової групи валків діаметром 320 мм це відношення становитиме $320 / 31 = 10,3$ (див. рис. 2). Тобто, для наведених параметрів прокатування відношення D_c/h_0 перевищує критичне значення з умов захвату, яке, згідно розрахунків становить 9,6, що свідчить про виконання умов захвату металу. Зменшення відношення D_c/h_0 для кліті № 14 до 8,5 не є критичним, з врахуванням дії бічних ділянок круглого калібру. Для інших клітей чистової групи, відповідно до зменшення початкової товщини розкату, це відношення буде зростати. Зокрема, для передчистової кліті це відношення становить близько 15, що свідчить про виконання умов захвату металу валками.

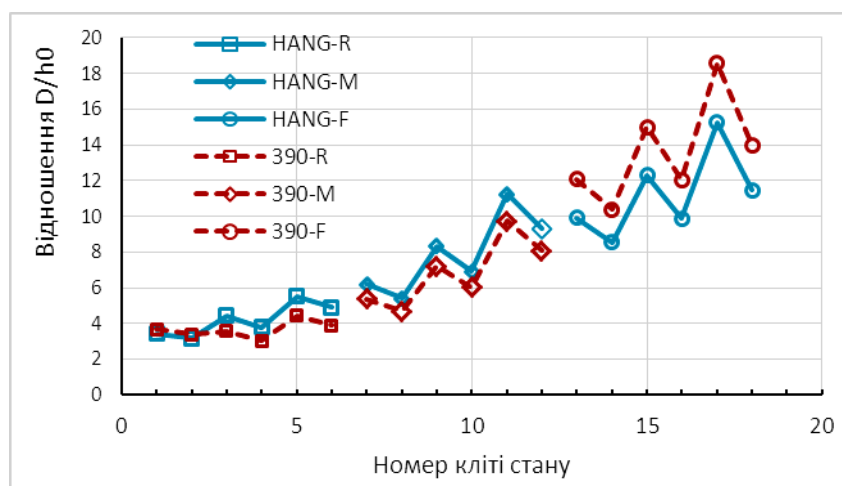


Рис. 2. Розподіл відношення діаметру валків до початкової товщини розкату по клітям стану

Таким чином, при виборі діаметру валків основними критеріями є умови захвату та технологічної ефективності. Враховуючи, що для визначення параметрів формозміни потрібно знати діаметр валків, їх можна попередньо визначати використовуючи критичне (з умов захвату) значення відношення D_c/h_0 . Рекомендовані значення цього відношення, з врахуванням округлення, становлять приблизно 4, 7 та 10, відповідно для чорнових, проміжних та чистових груп клітей. Призначення діаметрів валків, для яких це відношення буде більшим, цілком можливе, але потребує подальшої перевірки за критерієм технологічної ефективності. Слід відзначити, що за даними рис. 2, де показано відношення D_c/h_0 , для двох існуючих типових пруткових станів, не перевищує 20. Очевидно, що існують стани з дещо більшими значеннями цього відношення, але вони не досягають 50, згаданих у роботі [5].

Висновки

Загальновідомі критерії вибору діаметру валків пруткових станів, а саме з умов захвату, міцності та зносостійкості, можуть бути доповнені критерієм технологічної ефективності, який визначається як відношення коефіцієнтів видовження та розширення.

Згідно виконаних розрахунків, для чорнових та проміжних груп існуючих пруткових станів діаметри валків відповідають переважно критерію умов захвату, а для чистових груп клітей найбільш значимим стає критерій технологічної ефективності. Для більшості існуючих пруткових станів діаметри валків чистових груп перевищують значення, які відповідають критерію технологічної ефективності. Тому, використання валків з врахуванням цього критерію дозволить поліпшити техніко-економічні показники роботи пруткових станів, якщо більші діаметри не обумовлені іншими факторами.

Для попереднього призначення діаметру валків, з метою визначення технологічних параметрів, рекомендується використовувати відношення діаметру валків до початкової товщини розкату, значення якого становлять приблизно 4, 7 та 10, відповідно для перших клітей чорнових, проміжних та чистових груп клітей.

Список використаної літератури

1. Winning Technologies – MIDA-WLP & QSP-DUE. Danieli. 2024. URL: <https://www.danieli.com/>
2. Metallurgy. The first step for quality steel, aluminum, and copper. SMS Group GMBH. 2024.. URL: <https://www.sms-group.com/plants/metallurgy>
3. Orange is the new green. A new understanding ferrous metallurgy. Primetals Technologies. URL: Primetals Technologies | metallurgical enterprises
4. A new Danieli long-product rolling mill in operation in Brazil. Danieli. 2024. URL: https://www.danieli.com/en/news-media/news/a-new-danieli-long-product-rolling-mill-operation-brazil_37_864.htm
5. Самохвал В.М., Максименко О.П., Нікулін О.В., Приймак А.Б. Аналіз розмірних параметрів валків станів довгомірного прокату. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (Технічні науки)*. № 1(42). 2023. с. 17—26. DOI: 10.31319/2519-2884.42,2023.2
6. Roll mill rolls. Basics & How to Choose the Right Roll. LMM Group. 2022. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/roll-mill-rolls-basics-how-choose-right-steelmakinglmm>
7. Bar Rolling Process and Equipment Selection. HANI. 2018. URL: <https://hanrm.com/bar-rolling-process-and-equipment-selection/>
8. Іванченко Ф.К., Гребеник В.М., Ширяєв В.І. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів: Навчальний посібник. К.: Вища школа. 1995. 455 с.
9. Hwang J.K., Kim S.-J., Kim K.-J. Influence of Roll Diameter on Material Deformation and Properties During Wire Flat Rolling. *Applied Sciences*. MDPI. 11(18).2021. 14 p. DOI:10.3390/app11188381. URL: https://www.researchgate.net/publication/354481325_Influence_of_Roll_Diameter_on_Material_Deformation_and_Properties_during_Wire_Flat_Rolling
10. High-Speed Wire Rod and Bar Composite Line. HANGJI. 2024. URL: <https://hangjirollingmill.com/wire-rod-and-bar-line/>

CRITERIA FOR CHOOSING THE DIAMETERS OF THE ROLLS OF BAR ROLLING MILLS

Abstract

Rental manufacturers, depending on the product range and technology features, can choose equipment from a wide range offered by suppliers. Under such conditions, the question arises of a justified choice of roll diameters on rolling mill stands. Considering the significant impact of roll parameters on the technical and economic performance of rolling mills, the task of justified choice of roll diameter remains relevant and has significant practical significance in the design of new rolling mills.

The purpose of the work is the analysis of the criteria for choosing the diameters of the rolls, the assessment of the importance of the criterion of technological efficiency and the development of recommendations for the designation of the diameters of the rolls of bar mills.

From the review of the literature, it was found that the diameters of the rolls of the existing bar mills are chosen according to the criteria of bite conditions, strength and wear resistance. It is pro-

posed to supplement this complex with a criterion of technological efficiency, which is defined as the ratio of the coefficients of elongation and expansion. The rolling process is considered effective if the elongation factor exceeds the expansion factor. Otherwise, due to the prevailing transverse deformation, the elongation decreases, and the cross-sectional area of the roll increases accordingly, which does not correspond to the main purpose of rolling profiles of a simple shape. Based on the results of the calculations for the technological parameters of the existing bar mills, it was established that the diameters of the rolls of the rough and intermediate groups correspond mainly to the criterion of the bite conditions. For finishing groups, the diameters of the rolls, in most cases, significantly exceed the values determined from the gripping conditions. Using the proposed set of criteria, it was determined that for finishing groups of cages, the diameters of the rolls can be chosen in the range from 280 mm (according to the criterion of gripping conditions) to 320 mm (according to the criterion of technological efficiency).

For the preliminary assignment of the diameters of the rolls, for the purpose of calculating technological parameters, it is recommended to use the ratio of the diameter of the rolls to the initial rolling thickness D_c/h_0 . Recommended values D_c/h_0 for this parameter, determined from grip conditions, are approximately 4, 7, and 10, respectively, for the rough, intermediate, and finish stands groups.

The use of rolls, the diameters of which are determined using the proposed set of criteria, will improve the technical and economic performance of bar mills, if the larger diameters are not determined by other factors.

References

- [1] Winning Technologies – MIDA-WLP & QSP-DUE. (2024). Danieli. URL: <https://www.danieli.com/>
- [2] Metallurgy. The first step for quality steel, aluminum, and copper. (2024). SMS Group GMBH. URL: <https://www.sms-group.com/plants/metallurgy>
- [3] Orange is the new green. A new understanding ferrous metallurgy. . (2024). Primetals Technologies. URL: Primetals Technologies | metallurgical enterprises
- [4] A new Danieli long-product rolling mill in operation in Brazil. (2024). Danieli. URL: https://www.danieli.com/en/news-media/news/a-new-danieli-long-product-rolling-mill-operation-brazil_37_864.htm
- [5] Samokhval V.M., Maksymenko O.P., Nikulin O.V., Pryimak A.B. (2023). *Analiz rozmirnykh parametriv valkiv staniv dovhomirnoho prokatu. [Analysis of dimensional parameters of rolls of long products mills]. Zbirnyk naukovykh pratsi Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (Tekhnichni nauky). [Collection of scholarly papers of Dniprovsky State Technical University (Technical Sciences)].* 1(42). p.. 17—26. [in Ukrainian].
- [6] Roll mill rolls. Basics & How to Choose the Right Roll. (2018). LMM Group. 2022. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/roll-mill-rolls-basics-how-choose-right-steelmakinglmm>
- [7] Bar Rolling Process and Equipment Selection. HANI. URL: <https://hanrm.com/bar-rolling-process-and-equipment-selection/>
- [8] Ivanchenko F.K., Hrebenyk V.M., Shyriaiev V.I. (1995). *Rozrakhunok mashyn i mekhanizmiv prokatnykh tsekhiv : Navchalnyi posibnyk. [Calculation of machines and mechanisms of rolling shops: Tutorial].* Kyiv: Vyscha shkola. 455 p. [in Ukrainian].
- [9] Hwang J.K., Kim S.-J., KIM K.-J. (2021). Influence of Roll Diameter on Material Deformation and Properties During Wire Flat Rolling. *Applied Sciences*. MDPI. 11(18). 14 p. DOI:10.3390/app11188381. URL:https://www.researchgate.net/publication/354481325_Influence_of_Roll_Diameter_on_Material_Deformation_and_Properties_during_Wire_Flat_Rolling
- [10] High-Speed Wire Rod and Bar Composite Line. (2024). HANGJI. URL: <https://hangjirollingmill.com/wire-rod-and-bar-line/>