

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.4

УДК 621.771.2

Максименко О.П., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-0846-9869,
e-mail: 0976776379max@gmail.com

Нікулін О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-3509-7266, e-mail: av_nikulin@ukr.net
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Maksimenko Oleg, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of Metallurgy department
Nikulín Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Metallurgy department
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

МОДЕЛЮВАННЯ МОМЕНТУ ПРОКАТКИ З УРАХУВАННЯМ НАТЯЖІННЯ ШТАБИ ТА ЇЇ ПОЗДОВЖНЬОЇ СТІЙКОСТІ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ

Розрахунок моменту прокатки в каузальному ланцюжку визначення енерговитрат процесу обробки є актуальним і має значне практичне значення. За результатами математичного моделювання проаналізовано врахування режиму натягів розкату та умов рівноваги металу в осередку деформації на момент прокатки. До розрахункових формул включено результуючу поздовжніх сил, які виникають при пластичних деформаціях металу. При оцінюванні адекватності вдосконалених розрахункових формул виконане порівняння розрахункових і відповідних експериментальних значень моменту прокатки. Верифікація побудованої моделі успішна.

Ключові слова: момент прокатки; натягіння штаби; поздовжня стійкість; результуюча поздовжніх сил; адекватність розрахунку.

The calculation of the rolling moment in the causal chain of determining the energy consumption of the processing is relevant and has significant practical significance. Based on the results of mathematical modeling, the consideration of the tension regimes at processing and the conditions of metal equilibrium in the deformation zone at the time of rolling was analyzed. The calculation formulas include the resulting longitudinal forces that arise during plastic deformation of the metal. When assessing the adequacy of the improved calculation formulas, a comparison for the calculated and corresponding experimental values of the rolling moment was performed. Verification of the constructed model is successful.

Keywords: rolling moment; tension of the workpiece; longitudinal stability; resultant longitudinal force; adequacy of calculation.

Постановка проблеми

Одним з основних показників, що дозволяють оцінити ефективність роботи прокатного стану, є витрати електричної енергії в процесі обробки розкату [1]. Цій показник пов'язаний з потужністю та — завдяки каузальному ланцюжку — і з моментом прокатування, який розраховується відповідно до параметрів процесу прокатки. Крім того, величина моменту прокатування суттєво впливає на довготривалість обладнання, яке встановлено у головних лініях прокатних станів (шпинделів, шестеренних клітей тощо), тому точність розрахунків його значень дозволяє прогнозувати вірогідні значення потужності головних електродвигунів. Виходячи з цього, вдосконалення методів розрахунку моменту прокатки має важливе наукове-практичне значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Крутний момент, який необхідно прикласти до валків для забезпечення їх обертання під час прокатування, найчастіше розраховують одним із двох методів: на основі врахування контактних дотичних напружень або за силою прокатки [2—5]. Перший метод розрахунку ґрунтується на

припущенні про рівномірний розподіл нормальних та контактних напружень за контактною поверхнею, у зв'язку з чим його застосування для умов прокатки на тонколистових станах обмежено. Для зазначених умов доцільно використовувати другий метод розрахунку, в якому вплив характеру розподілу напружень за дугою контакту розкату з валками враховується через коефіцієнт плеча сили прокатки. При цьому момент прокатки з натягом смуги визначається за формулою [2]:

$$M_{i\delta} = P_{\zeta\alpha\bar{a}} \psi l_d + \frac{Q_0 - Q_1}{2} \cdot R, \quad (1)$$

де $P_{\zeta\alpha\bar{a}}$ — загальна рівнодіюча контактних сил; ψ — коефіцієнт плеча сили прокатки; l_d — довжина дуги контакту; Q_0 і Q_1 — сили заднього та переднього натягу смуги, відповідно; R — радіус валків.

Вектор сили $P_{\zeta\alpha\bar{a}}$, що входить до формули (1), спрямований вертикально. Однак при тонколистовій прокатці зі значними натягами смуги вектор цієї сили може суттєво відхилитися від вертикалі, що призводить до помилок у розрахунку моменту прокатки. Крім того, як показано в роботах [6 — 8], в осередку деформації діє середньоінтегральна результуюча поздовжня сила пластично деформованого металу $Q_{cp\bar{i}\delta}$, вплив якої на момент прокатки у розглянутих методах розрахунку не враховується. Разом з тим, дія сили $Q_{cp\bar{i}\delta}$ призводить до того, що ступінь відхилення загальної рівнодіючої контактних сил $P_{\zeta\alpha\bar{a}}$ від вертикалі збільшується, у зв'язку з чим помилка в розрахунку моменту прокатки за формулою (1) зростає.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є удосконалення методики розрахунку моменту прокатування при натяжінні штаби з урахуванням умов пластичної рівноваги в осередку деформації з оцінкою ступеня достовірності результатів моделювання, отриманої при порівнянні розрахункових та експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу дослідження

У роботі запропоновано визначати момент прокатки з натягом штаби, виходячи з рівнодіючого N нормальних тисків (рис. 1) з урахуванням кута докладання цієї сили ψ_1 та результуючої поздовжніх сил Q_{cpnp} . Як видно з наведеного рисунка, сили N_x (N_x — проекція сили N на напрям прокатки), Q_{cpnp} і Q_0 діють протилежно до напрямку прокатки і тому утворюють момент опору. Активні сили $T_{omc} - T_{on}$ (T_{omc} і T_{on} — рівнодіючі питомих сил тертя у зонах відставання і випередження, відповідно) і Q_1 створюють момент прокатки та забезпечують стійкість процесу, долаючи момент опору. Стійкий процес прокатки забезпечується, якщо виконується така умова:

$$2(T_{omc} - T_{on}) \cdot R + Q_1 \left(R + \frac{h_1}{2} \right) = Q_{cpnp} \left(R + \frac{h_1}{2} \right) + 2N_x \cdot \left(R - \frac{\Delta h_{\psi_1}}{2} \right) + Q_0 \left(R + \frac{h_1}{2} \right), \quad (2)$$

де h_1 — товщина смуги після пропуску; Δh_{ψ_1} — абсолютне обтиснення смуги в перерізі, що відповідає куту ψ_1 напрямку дії рівнодіючої N в осередку деформації.

Активні сили, що включені до лівої частини рівняння (2), визначаються таким чином:

$$T_{omc} - T_{on} = f_y p_{cp} R_c b (\alpha_y - 2\gamma), \quad Q_1 = \sigma_1 h_1 b, \quad (3)$$

f_y — коефіцієнт тертя в сталому процесі прокатування; p_{cp} — середній тиск металу на валки; R_c — радіус валків, визначений з урахуванням пружного сплюснення; b — ширина смуги; α_y — кут захоплення в сталому процесі прокатування; γ — кут нейтрального перерізу, розрахований з урахуванням дії сил Q_0 і Q_1 , а також поздовжньої сили $Q_{cp\bar{i}\delta}$; σ_1 — напруження переднього розтягу.

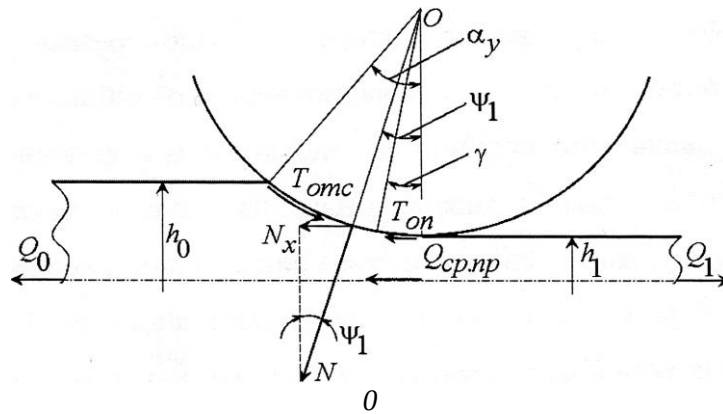


Рис. 1. Схема сил, що діють на розкат в одній кліті

Сили, що включені до правої частини рівняння (2) і перешкоджають процесу прокатування, розраховуються наступним чином:

$$N_x = N \sin \psi_1 \approx p_{cp} l_c b \psi_1, \quad Q_{cp,np} = Q_{cp,np}^* 2k_{cp} R_c b, \quad Q_0 = \sigma_0 h_0 b, \quad (4)$$

де l_c — довжина дуги контакту, визначена з урахуванням сплюснення валків; $Q_{cp,np}^*$ — безрозмірна результуюча поздовжніх сил пластично деформованого металу, що розрахована згідно з роботами [6 — 8]; $2k_{cp}$ — середнє значення опору матеріалу штаби чистому зсуву; σ_0 — заднє натягіння розтягу.

Оскільки $R_c \gg \Delta h_{\psi_1}$, то $R - \Delta h_{\psi_1}/2 \approx R$. З урахуванням цього, а також співвідношень (3) і (4), умова рівноваги (2) перетворюється до виду:

$$\left(R + \frac{h_1}{2}\right) \left(Q_{cp,np}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \cdot \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \cdot \frac{h_1}{R}\right) + 2 \cdot \frac{p_{cp}}{2k_{cp}} \cdot l_c \cdot \psi_1 = 2 f_y \frac{p_{cp}}{2k_{cp}} R_c (\alpha_y - 2\gamma). \quad (5)$$

З рівняння (5) визначається кут прикладання результуючої нормального тиску:

$$\psi_1 = f_y \cdot \left(1 - \frac{2\gamma}{\alpha_y}\right) - \frac{2R + h_1}{4l_c} \cdot \frac{1}{p_{cp}/2k_{cp}} \cdot \left(Q_{cp,np}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \cdot \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \cdot \frac{h_1}{R}\right). \quad (6)$$

Як впливає з формули (6), зі збільшенням результуючого $Q_{cp,np}^*$ і заднього натягіння смуги кут прикладання результуючого контактного тиску N зменшується. З посиленням режиму тертя і збільшенням переднього натягу смуги цей кут, навпаки, збільшується. При цьому сумарний момент опору, який повинні подолати валки, з урахуванням натягу смуги, дії результуючих поздовжніх сил в зоні деформації і того, що $R - \Delta h_{\psi_1}/2 \approx R$, визначається так:

$$M_{np} = (Q_{cp,np} + Q_0 - Q_1) \cdot \left(R + \frac{h_1}{2}\right) + 2N_x R. \quad (7)$$

З урахуванням співвідношень (3) і (4) формула (7) зводиться до вигляду:

$$M_{np} = 2k_{cp} R b \left[\left(Q_{cp,np}^* + \frac{\sigma_0}{2k_{cp}} \cdot \frac{h_0}{R} - \frac{\sigma_1}{2k_{cp}} \cdot \frac{h_1}{R}\right) \cdot \left(R + \frac{h_1}{2}\right) + 2 \frac{p_{cp}}{2k_{cp}} \cdot l_c \cdot \psi_1 \right]. \quad (8)$$

Розрахуємо кут ψ_1 і визначимо значення моменту прокатки при деформації металу з натягінням і з урахуванням результуючих поздовжніх сил $Q_{cp,np}$ в осередку деформації для умов, наведених у [9], і порівняємо отримані дані з експериментальними. У книзі [9] за

М.М. Саф'яном наведені результати дослідження енергосилових та інших параметрів при гарячій прокатці листової сталі у чистовій групі клітей безперервного стану 1680. Для випадку прокатки тонкого листа поперечними розмірами 3×1400 мм зі сталі СтЗкп, параметри якого наведені в табл. 1, розраховано за методикою [8] епюри контактних та горизонтальних σ_x нормальних напружень, а також поточну поздовжню силу і знайдемо її середнє інтегральне результуюче значення в осередку деформації, що дозволить визначити кут ψ_1 і момент $M_{i\delta}$. Результати розрахунків та експериментальні дані наведені в табл. 1, де Δ — розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями моменту прокатки.

Таблиця 1. Параметри деформації, результати розрахунку та експериментальні дані моменту прокатки смуги на стані 1680

№ кл.	h_0 , мм	R_c , мм	α , рад	f_y	γ , рад	$\sigma_0/2k_{cp}$	$\sigma_1/2k_{cp}$	$Q^*_{cp, np}$	$p_{cp}/2k_{cp}$	ψ_1 , рад	M_n , кН·м		
											розр.	експ.	Δ , %
5	13,62	305	0,209	0,300	0,078	0	0,28	-0,0203	1,3410	0,061	630	781	-24,6
6	8,33	305	0,131	0,235	0,037	0,28	0,20	-0,0006	1,030	0,073	410	385	6,1
7	5,61	342	0,089	0,185	0,030	0,20	0,14	-0,0028	1,160	0,054	297	270	9,1
8	4,28	367	0,059	0,180	0,025	0,14	0,23	-0,0025	1,170	0,015	136	157	-15,4
9	3,37	388	0,048	0,180	0,018	0,23	0,13	-0,0020	1,220	0,018	120	100	16,7
10	3,00	409	0,030	0,180	0,013	0,13	0,01	-0,0019	1,250	0,016	38,0	47,5	-25,0

Як видно з табл. 1, результуюча $Q_{cp i \delta} < 0$ для всіх клітей чистової групи на стані, тобто вона спрямована протилежно руху штаби, з чого випливає, що процес прокатки здійснюється стабільно. Кут ψ_1 близький до кута нейтрального перерізу γ , що відповідає висновкам О.О. Корольова, які наведені в [9]. Якщо врахувати, що експериментальні значення моменту прокатки включають втрати на тертя в підшипниках валків, то результати розрахунку $\dot{I}_{i\delta}$ в цілому відповідають експериментальним даним.

Подібні розрахунки були проведені при аналізі експериментальних даних холодної прокатки смуги з початковою товщиною 1,95 мм і шириною 30 мм, наведених у [9]. У цих експериментах заднє і переднє натягнення змінювалися в широких межах. Крім того, експеримент включав вимірювання нормального тиску, сплющеної довжини зони деформації, сили прокатки та моменту.

Результати експериментів і теоретичні розрахунки наведені в табл. 2 (номера відповідають [9]).

Таблиця 2. Експериментальні дані та результати розрахунку моменту холодної прокатки смуги з на тяжінням

№ об.	h_0 , мм	R_c , мм	α , рад	f_y	γ , рад	$\sigma_0/2k_{cp}$	$\sigma_1/2k_{cp}$	$Q^*_{cp, np}$	$p_{cp}/2k_{cp}$	$2k_{cp}$, Н/мм ²	ψ_1 , рад	M_n , Н·м		
												розр.	експ.	Δ , %
90	1,40	344	0,040	0,11	0,016	0,021	0,0	-0,0024	1,54	445	0,014	1550	1440	7,1
91	1,32	308	0,045	0,12	0,012	0,389	0,0	-0,0005	1,13	435	0,032	2650	2240	15,5
92	1,30	262	0,050	0,22	0,012	0,674	0,0	-0,0003	1,13	440	0,030	3050	2720	10,8
93	1,63	319	0,032	0,11	0,013	0,021	0,0	-0,0018	1,33	400	0,020	1240	1100	11,3
94	1,50	282	0,040	0,13	0,011	0,317	0,0	-0,0004	1,10	420	0,031	2740	3000	-9,5
95	1,36	325	0,043	0,13	0,017	0,015	0,0	-0,0034	1,74	435	0,021	2120	1760	17,0
96	1,35	249	0,049	0,13	0,024	0,015	0,370	-0,0024	1,32	440	0,010	1420	1120	21,1
97	1,32	346	0,043	0,11	0,017	0,0	0,0	-0,0027	1,65	445	0,016	1810	1600	11,6
98	1,30	254	0,051	0,13	0,016	0,280	0,080	-0,0014	1,27	445	0,027	2560	2500	2,3
99	1,20	231	0,057	0,24	0,016	0,668	0,289	-0,0007	1,18	450	0,023	2750	2300	16,3

З табл. 2 випливає, що розрахунковий момент $M_{пр}$ близький до експериментальних значень.

Практично у всіх випадках теоретичні значення моменту прокатки перевищують експериментальні. При значному задньому натягу штаби (зразки 92 і 99) теоретично процес стабільний тільки при посиленому режимі тертя ($f_y > 0,2$). На практиці в тих випадках, коли $\sigma_0/2k_{ср} = 0,3...0,7$ прокатка проводиться в граничних умовах (зразки 91, 92 і 94).

Для верифікації розробленої моделі розрахунку моменту прокатування було проведено кореляційний аналіз розрахункових та відповідних експериментальних даних, наведених у табл. 1 і табл. 2. Застосовано коефіцієнт кореляції Браве-Пірсона. За його допомогою знайдені значення коефіцієнту детермінації, який є мірою достовірності лінійної регресії.

Для умов гарячої прокатки на стані 1680 і даних у табл. 1 отримано наступні значення: коефіцієнт кореляції Браве-Пірсона $r = 0,981$; коефіцієнт детермінації $d = 0,962$. Для умов прокатки сталевий смуги та даних табл. 2 маємо: коефіцієнт кореляції Браве-Пірсона $r = 0,949$; коефіцієнт детермінації $d = 0,901$.

При усередненні отриманих значень коефіцієнт кореляції Браве-Пірсона $r = 0,965$; коефіцієнт детермінації $d = 0,931$.

Статистичний аналіз показав, що на обидві ознаки (розрахункове та експериментальне значення моменту прокатування) впливають загальні фактори. Їхня частка становить від 90 % до 96,2 % впливу при середній частці 93,1 %. Величини відхилень між розрахунковими й експериментальними значеннями співставні з похибками при визначенні енергосилових параметрів дослідним шляхом [10].

Стійкість процесу дещо підвищується, якщо до смуги прикладено значне переднє натягіння (зразок 99). Ці висновки засновані на аналізі результуючої поздовжніх сил $Q_{ср\delta}$. Важливо також підкреслити, що при прокатці без натягу (зразок 97) складова моменту, що пов'язана з силою $Q_{ср\delta}$ (формула (8)), приблизно дорівнює половині від $2N_x \cdot R$, у зв'язку з чим впливом цієї сили на момент прокатки нехтувати не слід.

Отримані оцінки підтверджують успішність верифікації побудованої моделі.

Висновки

Вдосконалено метод розрахунку моменту при прокатуванні штаби з натягінням, а також з урахуванням впливу результуючої поздовжніх сил, прикладених до металу, що піддається пластичній деформації. Результати порівняння дослідних і розрахункових даних показали, що запропонований метод можна рекомендувати для визначення моменту при прокатці з натягінням штаби.

Список використаної літератури

1. Бешта О.С., Балахонцев О.В., Бородай В.А. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві. Дніпропетровськ: НГУ, 2010. 225 с.
2. Грудев А.П. Теория прокатки. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 280 с.
3. Василев Я.Д., Мінаєв О.А. Теорія поздовжньої прокатки. Донецьк: УНІТЕХ, 2009. 448 с.
4. Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications. CRC Press. Taylor and Francis Group, 2019. 479 p.
5. Мазур В.Л. Теория и технология прокатки: нерешенные задачи и аспекты развития. *Металл и литье Украины*. 2019. № 5–6 (312–313). С. 48–55.
6. Максименко О.П., Романюк Р.Я. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. №1. С. 41–43.
7. Максименко О.П., Лобойко Д.И., Романюк Р.Я. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. №6. С. 47–49.
8. Максименко О.П., Лобойко Д.И., Измайлова М.К. Продольная устойчивость полосы в валах с анализом контактных условий: монография. Днепропетровск, 2016. 212 с.

9. Системний підхід, методи досліджень процесів прокатування з аналізом поздовжньої сталості: навч. посіб. / О.П. Максименко, О.В. Нікулін, В.М. Самохвал, Д.І. Лобойко. Кам'янське: ДДТУ, 2021. 347 с.
10. Клименко П.Л., Данченко В.М. Контактні напруги при прокатці: монографія. Дніпропетровськ: Пороги, 2007. 292 с.

MODELING OF ROLLING MOMENT TAKING INTO ACCOUNT THE TENSION OF THE WORKPEACE AND ITS LONGITUDINAL STABILITY IN THE ZONE OF DEFORMATION

Abstract

The calculation of the rolling moment for the parameters at the deformation process in the causal chain of determining the energy consumption for the processing is relevant and has significant practical significance. For sheet rolling conditions, it is advisable to use a calculation method that takes into account the influence of longitudinal forces, as well as the mode of the stress distribution on the contact surfaces with the rolls through the rolling force shoulder coefficient. By the results of mathematical modeling, the significance of the rolling stress regime and the conditions of metal equilibrium in the deformation zone at the time of rolling was analyzed. The calculation formulas include the resulting longitudinal forces that arise during plastic deformation of the metal, while maintaining the conditions of longitudinal stability of the process. The results of the research of energy-power and other parameters at hot rolling of sheet steel in the finishing group of continuous mill stands 1680, as well as data on cold rolling for the strip with an initial thickness of 1.95 mm and a width of 30 mm, were analyzed. When assessing the adequacy of the improved calculation formulas, a comparison of the calculated and corresponding experimental values of the rolling moment was performed. To verify the developed model for calculating the rolling moment, a correlation analysis of the calculated and corresponding experimental data was conducted. The Brave-Pearson correlation coefficient was used. The magnitudes of deviations between the calculated and experimental values of the moments are comparable to the errors in determining the energy-power parameters experimentally. Verification of the constructed model was successful.

References

- [1] Beshta O.S., Balakhontsev O.V. & Boroday V.A. (2010). *Avtomatyzovanyy elektropriyvod u prokatnomu vyrobnytstvi [Automated electric drive in rolling production]*. Dnipropetrovsk: NHU. [In Ukrainian].
- [2] Grudev A.P. (2001) *Teoriya prokatki [Theory of rolling]*. Internet Inzhiniring. [In Russian].
- [3] Vasylev Ya.D., Minayev O.A. (2009). *Teoriya pozdovzhn'oyi prokatky [Theory of longitudinal rolling]*. Donetsk: UNITEKH. [In Ukrainian].
- [4] Mazur V.L. & Nogovitsyn O.V. (2019). *Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications*. CRC Press. Taylor and Francis Group.
- [5] Mazur V.L. (2019). *Teoriya i tekhnologiya prokatki: nereshennyye zadachi i aspekty razvitiya [Theory and technology of rolling: unsolved problems and development aspects]*. *Metall i lit'ye Ukrainy*. 5–6 (312–313). 48–55. [In Russian].
- [6] Maksimenko O.P. & Romanyuk R.Ya. (2011). *Utochneniye usloviy prodol'noy ustoychivosti protsessa prokatki [Clarification of conditions for longitudinal stability of the rolling process]*. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1. 41–43. [In Russian].
- [7] Maksimenko O.P., Loboyko D.I. & Romanyuk R.Ya. (2013). *Analiz silovogo vzaimodeystviya v ochage deformatsii pri prokatke [Analysis of force interaction in the deformation zone during rolling]*. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 6. 47–49. [In Russian].
- [8] Maksimenko O.P., Loboyko D.I. & Izmaylova M.K. (2016). *Prodol'naya ustoychivost' polosy v valkakh s analizom kontaknykh usloviy [Longitudinal stability of the strip in rolls with analysis of contact conditions]: monografiya*. Dneprodzerzhinsk: DHTU. [In Russian].

-
- [9] Maksymenko O.P., Nikulin O.V., Samokhval V.M. & Loboyko D.I. (2021) *Systemnyy pidkhyd, metody doslidzhen' protsesiv prokatuvannya z analizom pozdovzhn'oyi stalosti [Systemic approach, methods of research the rolling processes with analysis of longitudinal stability]: navch. posib.* Kam'yanske: DDTU. [In Ukrainian].
- [10] Klymenko P.L. & Danchenko V.M. (2007). *Kontaktni napruhy pry prokatti [Contact stresses during rolling: monograph]: monohrafiya.* Dnipropetrovs'k: Porohy. [In Ukrainian].

Надійшла до редколегії 25.12.2024