

МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.1

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_nikulín@ukr.net

Ляшенко В.С., аспірант, e-mail: vladimir.13734@gmail.com

Петришин В.В., магістрант,

e-mail: usercomfy070320173@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

Maksimenko Oleg, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure

Nikulín Olexander, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure

Lyashenko Volodymyr, Postgraduate Student at

Petryshyn Valentyn, Master's Degree Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ З ТЕХНОЛОГІЧНИМ МАСТИЛОМ ПРИ ОДНОЗОННОМУ КОВЗАННІ МЕТАЛУ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ

Для теоретичного обґрунтування можливості стійкого процесу з однозонним ковзанням металу у валках при холодному прокатуванні з ефективними технологічними мастилами використовується моделювання напруженого стану. При законі Ньютона сили тертя, що діють в осередку деформації, залежать від швидкості ковзання металу по валках та від товщини мастильної плівки. Результати розрахунків в умовах контактно-гідродинамічного тертя доводять, що максимум нормального тиску зміщується ближче до входу в осередок деформації. У разі прокатки з від'ємним випередженням поздовжні нормальні напруження розтягування виникають поблизу перерізу на виході металу з валків. Середній тиск в осередку деформації завжди більше вимушеної границі плинності для смуги, що прокатується. Зі збільшенням відставання металу від валків на виході з осередку деформації середній тиск знижується. Прокатка із однозонним ковзанням смуги є енергетично вигідним процесом.

Ключові слова: *холодне прокатування; технологічні мастила; контактно-гідродинамічне тертя; осередок деформації; напруження.*

Stress state modeling is used to theoretically substantiate the possibility of a stable process with single-zone sliding of metal in rolls during cold rolling with effective technological lubricants. According to Newton's law, the frictional forces acting in the zone of deformation depend on the sliding speed of the metal on the rolls and on the thickness of the lubricating film. The results of calculations in the conditions of contact-hydrodynamic friction prove that the maximum of normal pressure shifts closer to the entrance to the deformation zone. In the case of rolling with a negative advancing, the longitudinal normal tensile stresses occur near the cross-section at the exit of the metal from the rolls. The average pressure in the deformation zone is always greater than the forced yield strength for the rolling strip. With an increase in the lag of the metal from the rolls at the exit from the zone of deformation, the average pressure decreases. Rolling with single-zone strip sliding is an energy-efficient process.

Keywords: *cold rolling; technological lubricants; contact-hydrodynamic friction; zone of deformation; stresses.*

Постановка проблеми

Одним зі спірних положень теорії прокатки є питання про можливість сталого процесу холодної прокатки з мащенням при повному відставанні штаби в осередку деформації, тобто в умовах від'ємного випередження. З цього питання в технічній літературі існують дві точки зору. З погляду ряду дослідників, включаючи А. Хейна [1], стійкий процес прокатування при від'ємному випередженні неможливий, тому що суттєве зменшення критичного кута до нульового значення повинне привести до нестійкого процесу з проявою буксування. Разом з тим, у роботі [2] автори описують стійкий процес прокатування зі швидкістю штаби на виході з осередку деформації помітно меншою, ніж лінійна швидкість валків. У цих дослідах зразки з алюмінію прокатували без нагріву з використанням касторової олії для змащення. Експерименти [3—6] підтверджують можливість сталого процесу прокатування з технологічним змащенням при однозонному ковзанні металу у валках. Причому, при зростанні в'язкості мастила, зростає різниця швидкостей валків і штаби на виході металу з осередку деформації. Дослідники пояснюють стійкість процесу деформації наявністю залежності коефіцієнту тертя від швидкості ковзання металу в валках. Дія цього режиму тертя не обмежується умовою, коли

$$R_{zв} + R_{zш} < \xi_1,$$

де $R_{zв}$ і $R_{zш}$ — середня висота мікронерівностей поверхонь валка і штаби; ξ_1 — товщина шару мастила на виході металу з осередку деформації.

Він також можливий й у випадках, якщо товщина ξ_1 менше сумарної висоти мікронерівностей [7].

Очевидно, що відповідні умови можуть мати місце і при промисловій прокатці у разі важконавантаженого контакту і тонкоплівкового мастила.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Не заперечуючи ролі швидкості ковзання у забезпеченні стійкості процесу прокатки з мащенням, відзначимо, що рівноважний стан в осередку деформації при від'ємному випередженні може підтримуватися внаслідок зміни товщини мастильної плівки. Про це свідчать дослідні дані з вивчення залежності випередження S та товщини шару мастила ξ_1 від кута захвату α_y при холодній прокатці мідних зразків ($h_0 \times b_0 = 5 \times 60$) мм з рициновою олією.

Прокатку проводили на лабораторному стані дуо 180 у сталевих валках діаметром 190 мм. Швидкість прокатки становила $v_b = 0,35$ м/с. Як бачимо з результатів дослідів, наведених на рис. 1, крива випередження складається з двох ділянок. При малих кутах захоплення та значній товщині мастильної плівки процес відбувається стійко з від'ємним випередженням аж до $\alpha_y = 0,06$ рад. При подальшому збільшенні цього кута швидкість смуги зростає і в осередку деформації виникає зона випередження, від'ємне випередження зникає.

З погляду теорії прокатки [8, 9] при зазначеному куті захоплення процес здійснюється у граничних умовах. Дійсно, при подальшому зменшенні кута захвату зростає товщина мастильної плівки в осередку деформації та зменшується коефіцієнт тертя, виштовхуючі сили починають перевищувати тягучі сили, що веде до зниження швидкості руху смуги та збільшенню ковзання металу в валках. При цьому згідно до контактно-гідродинамічної теорії [10, 11] зростають сили тертя у зоні деформації. В результаті встановлюється нова рівновага сил в осередку деформації, але при швидкості руху смуги на виході з валків менше лінійної швидкості валків, тобто при від'ємному випередженні.

Зрозуміло, що при прокатуванні з від'ємним випередженням роль регулятора рівноваги смуги в осередку деформації виконують як величина ковзання металу в валках, так і товщина мастильної плівки. Для розвитку теорії прокатки важливим є перехід від узагальнення дослідних даних до математичного моделювання стійкого процесу прокатування з від'ємним випередженням.

Формулювання мети дослідження

У зв'язку з викладеним, метою роботи є уточнення умов стійкого процесу з однозонним ковзанням металу в осередку деформації на основі аналізу холодного прокатування у режимі тонкоплівкового мащення (контактно-гідродинамічна теорія) з визначенням кінематичних і силових параметрів.

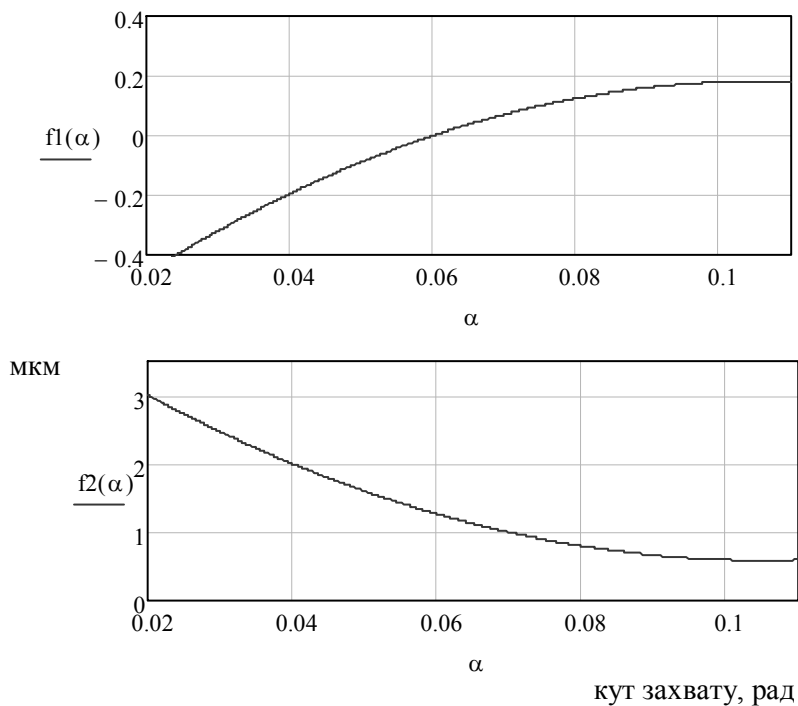


Рис. 1. Експериментальні залежності випередження (f_1) і товщини шару мастила (f_2) при прокатуванні мідних зразків

Виклад основного матеріалу

За наявності рідкого мастила на поверхнях контакту валків та смуги в осередку деформації найбільш обґрунтованою моделлю тертя служить закон Ньютона. Для детальнішого вивчення закономірностей прокатки при однозонному ковзанні металу у валках провели дослідження контактних напруг при гідродинамічному терті. Зауважимо, що у зв'язку з розглядом важконавантаженого контакту динамічна в'язкість мастила істотно залежить від тиску. Закон Баруса [12], що визначає цю залежність, не відображає реальної картини зміни в'язкості при високих тисках в осередку деформації через можливість переходу мастила в квазітвердий фазовий стан. Тому довелося усереднити значення в'язкості в контактній смугі металу з валками.

При виведенні формул виходили з припущення, що сили тертя при контактній-гідродинамічному режимі та кулонівської моделі (для твердих тіл) рівні між собою, тобто

$$\eta_{\text{сеп}} \frac{v_{\text{ксеп}}}{\xi_{\text{сеп}}} = f_y P_{\text{сеп}},$$

де $\eta_{\text{сеп}}$ — середнє по осередку деформації значення динамічної в'язкості; $v_{\text{ксеп}} = \frac{v_6 \cdot \Delta h}{3 h_1}$ —

середня швидкість ковзання по осередку; $\xi_{\text{сеп}}$ — середня товщина мастильної плівки по осередку; f_y — коефіцієнт тертя при процесі прокатки, що встановився; $P_{\text{сеп}}$ — середній тиск по осередку деформації.

Далі застосування до осередку деформації тертя згідно до закону Ньютона описується формулою

$$t_x = \frac{f_y P_{\text{сеп}} \xi_{\text{сеп}}}{v_{\text{ксеп}}} \cdot \frac{v_6 - v_x}{\xi_x},$$

де t_x — поточне дотичне напруження на поверхні контакту; v_x — поточна швидкість смуги; $v_в$ — лінійна швидкість валків; ξ_x — поточна по осередку деформації товщина шару мастила.

У першому наближенні приймемо, що $\xi_x = \xi_{ср}$. Тоді маємо:

$$t_x = \frac{f_y P_{ср}}{v_{ксер}} \cdot (v_в - v_x).$$

Підставивши отриману модель питомих сил тертя у диференціальне рівняння рівноваги Т. Кармана [8] і розв'язавши його за відомих граничних умов, отримали вираз для розподілу тиску та дотичних напружень. Зауважимо, що граничні умови на виході з осередку деформації використовували для уточнення середньої швидкості ковзання $v_{ксер}$.

На рис. 2 наведено епюри контактних напруг для трьох випадків прокатки, у разі: 1 — за наявності випередження; 2 — при його нульовому значенні; 3 — при однозонному ковзанні металу у валках. Моделювання вище зазначених випадків прокатки забезпечували шляхом зміни коефіцієнта тертя за інших незмінних умов:

$$\frac{h_0}{h_1} = 1,245; \quad \alpha_y = 0,0468 \text{ рад}; \quad \frac{R}{h_0} = 89,9.$$

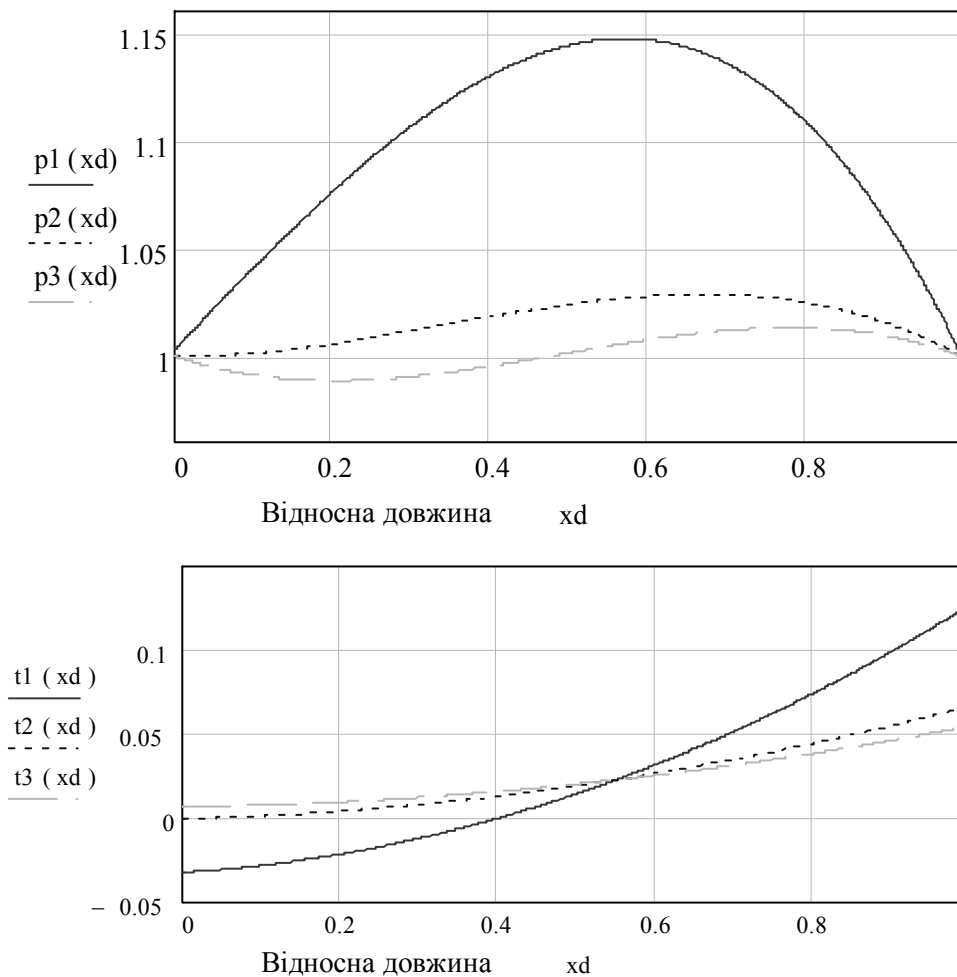


Рис. 2. Розподіл (епюра) безрозмірних тиску (pI) та напруги тертя (tI) по довжині осередку деформації

При коефіцієнті тертя, якій дещо перевищує кут захоплення ($f_y = 0,0585$; $\frac{P_{сеп}}{\beta \sigma_T} = 1,095$; $\frac{v_{ксеп}}{v_в} = 0,082$; $S = 4,1\%$;) отримані епюри (криві p1 та t1), характерні для звичайного процесу прокатки: куполоподібний розподіл тиску з максимумом, дещо зміщеним до площини поперечного перерізу на вході в зону деформації.

При коефіцієнті тертя, коли випередження дорівнює нулю ($f_y = 0,0323$; $\frac{P_{сеп}}{\beta \sigma_T} = 1,017$; $\frac{v_{ксеп}}{v_в} = 0,098$; $S = 0\%$;) крива епюри нормального тиску (крива p2) знаходиться ближче до поздовжньої осі (тобто розміщується нижче) у порівнянні з попереднім випадком, що відповідає існуючій теорії прокатки. Максимум цієї епюри ще більше зміщений до входу в осередок деформації, а напруги тертя приймають нульові значення в площині виходу з осередку. Важливо відмітити, що по всій довжині осередку деформації безрозмірний тиск не менший за одиницю $\frac{P_x}{\beta \sigma_T} \geq 1$. Це свідчить про те, що у разі прокатки з нульовим випередженням і гідродинамічної моделі тертя в зоні пластичної деформації поздовжні нормальні напруги σ_x не є розтягуючими.

При прокатуванні з від'ємним випередженням ($f_y = 0,0281$; криві p3 та t3) поблизу виходу металу з валків напруження σ_x будуть розтягуючі та відношення $\frac{P_x}{\beta \sigma_T} < 1$.

Проаналізуємо залежність безрозмірного середнього тиску $\frac{P_{сеп}}{\beta \sigma_T}$ від випередження при прокатуванні з технологічним мастилом. Значення $\frac{P_{сеп}}{\beta \sigma_T}$ отримали при числовій обробці епюру тиску. Результати розрахунків подано на рис. 3. Графічні дані показують, що при прокатці з від'ємним випередженням, середній тиск наближається до значення вимушеної границі плинності.

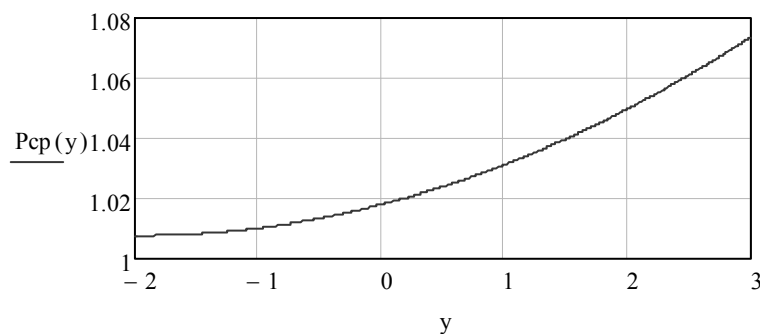


Рис. 3. Залежність відносного середнього тиску $P_{ср} = \frac{P_{сеп}}{\beta \sigma_T}$ від випередження при холодній прокатці з мащенням

Очевидно, що при однозонному ковзанні металу у валках всі енергосилові параметри прокатки будуть нижчими порівняно з варіантами деформацій за наявності додатного випередження (дві або три зони в осередку деформації). Отже, процес прокатки з існуванням лише зони відставання є енергетично вигідним.

У загальноприйнятій теорії прокатки вважається, що стійким процес деформації може бути лише за наявності запасу сил тертя в осередку деформації, тобто за існування зони випередження. Однак дане дослідження показує, що при прокатці зі змащенням (якщо діє ньютонівська модель сил тертя) запас сил тертя в осередку деформації визначається не тільки наявністю зони випередження, але і величиною товщини шару мастила, а також швидкості ковзання металу у валках. Це дає можливість дати теоретичне пояснення та виконати розрахунковий підбір параметрів стійкого, енергетично вигідного процесу прокатки зі змащенням з однозонним ковзанням металу у валках.

Висновки

При холодному прокатуванні з ефективними технологічними мастилами можливий стійкий процес при однозонному ковзанні металу у валках. Для теоретичного обґрунтування такого висновку використовується моделювання прокатки при законі тертя Ньютона. Відповідно до нього сили тертя, що діють в осередку деформації, залежать від швидкості ковзання металу по валках та від товщини мастильної плівки.

Результати розрахунків в умовах контактної-гідродинамічного тертя доводять, що максимум нормального тиску зміщується ближче до входу в осередок деформації. У разі прокатки з від'ємним випередженням поздовжні нормальні напруження розтягування виникають поблизу виходу металу з валків. Середній тиск в осередку деформації завжди більше вимушеної границі плинності для смуги, що прокатується.

Зі збільшенням відставання металу від валків на виході з осередку деформації середній тиск знижується. Прокатка із однозонним ковзанням смуги є енергетично вигідним процесом.

Список використаної літератури

1. Хейн А.Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки. М.: Металлургиздат, 1941. 247 с.
2. Павлов И.М., Белосевич В.К. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке. *Известия вузов. Черная металлургия*, 1961. № 10. С. 46–49.
3. Помп А., Видиге Г. Исследование холодной прокатки стали, плакированной никелем, медью и латуной. *Металлург*, 1938. № 7-8. С. 144–146.
4. Старченко Д.И., Капланов В.И., Шемякин А.В. Особенности высокоскоростной прокатки со сверхвысоким отставанием. *Обработка металлов давлением. Тр. Ждановского металлургического института*, 1969. Вып. XVIII. С. 123–129.
5. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков. М.: СП Интермет Инжиниринг, 1998. 283 с.
6. Николаев В.А. Технологические параметры прокатки с вязкими смазками. *Известия вузов. Черная металлургия*, 1995. № 4. С. 29–32.
7. Максименко О.П., Лейко О.Є. Основи трибології: Навч. посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2005. 192 с.
8. Целиков А. И., Гришков А.И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970. 358 с.
9. Грудев А.П. Теория прокатки. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2001. 280 с.
10. Коднир Д.С. Контактная-гидродинамическая теория смазки. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1963. 183 с.
11. Петрусевич А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. *Известия АН СССР. ОНТ*. 1951. № 2. С. 209–223.
12. Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2-х кн. М.: Машиностроение. 1979. Кн. 2 /под ред.: И.В. Крагельского, В.В. Аликина. 358 с.

STUDY OF THE ROLLING PROCESS WITH TECHNOLOGICAL LUBRICANT AT SINGLE-ZONE SLIPPING METAL IN THE ZONE OF DEFORMATION

Abstract

One of the controversial provisions the rolling theory is the question of the possibility the stable process of cold rolling with lubrication at a complete lag of the strip's metal in the deformation zone, i.e. in conditions of negative advancing.

The equilibrium state in the zone of deformation with negative advance can be maintained due to the change in the thickness of the lubricating film. This is evidenced by experimental data from the study of the dependence of the advancing and the thickness of the lubricant layer on the grip angle during cold rolling with castor oil the copper samples in sizes 5x60 mm. Rolling was carried out on a duo 180 laboratory mill in steel rolls with a diameter of 190 mm. The rolling speed was 0.35 m/s.

Then stress state modeling is used to theoretically substantiate the possibility of a stable process with single-zone sliding of metal in rolls during cold rolling with effective technological lubricants. According to Newton's law, the frictional forces acting in the zone of deformation depend on the sliding speed of the metal on the rolls and on the thickness of the lubricating film.

Substituting the chooses model of specific friction forces into T. Karman's differential equation of equilibrium and solving it under known boundary conditions, expressions for the distribution of contact stresses were obtained.

The results of calculations in the conditions of contact-hydrodynamic friction prove that the maximum of normal pressure shifts closer to the entrance to the deformation zone. In the case of rolling with a negative advancing, the longitudinal normal tensile stresses occur near the cross-section at the exit of the metal from the rolls. The average pressure in the deformation zone is always greater than the forced yield strength for the rolling strip.

With an increase in the lag of the metal from the rolls at the exit from the zone of deformation, the average pressure decreases. Rolling with single-zone strip sliding is an energy-efficient process.

References

- [1] Khein, A.Ya. (1941) *Protsess lentochnoi i tonkolistovoi prokatki [Strip and sheet rolling process]* M.: Metallurgizdat [in USSR].
- [2] Pavlov, I.M., Belosevich, V.K.(1961) *K voprosu ob otritsatelnom operezhenii pri prokatke [On the issue of negative advance during rolling]* *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiiia* [in USSR].
- [3] Pomp, A., Vidige, G. (1938) *Issledovanie kholodnoi prokatki stali, plakirovannoi nikelem, mediu i latuniu [Investigation of cold rolling of steel clad with nickel, copper and brass]* *Metallurg* [in USSR].
- [4] Starchenko, D.I., Kaplanov, V.I., Shemiakin, A.V. (1969) *Osobennosti vysokoskorostnoi prokatki so sverkhvysokim otstavaniem [Features of high-speed rolling with ultra high lagging]* *Obrabotka metallov davleniem. Tr. Zhdanovskogo metallurgicheskogo instituta – work of the Zhdanov Metallurgical Institute, XVIII* [in USSR].
- [5] Grydev, A.P. (1998) *Zakhvatyvaiushchaia sposobnost prokatnykh valkov [Gripping ability of rolling rolls]* M.: SP Internet Inzhinirinh [in Ukrainian].
- [6] Nikolaev, V.A. (1995) *Tekhnologicheskie parametry prokatki s viazkimi smazkami [Technological parameters of rolling with viscous lubricants]*. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiiia – Izvestiia vuzov. Ferrous metallurgy*, 4, P. 29–32 [in Ukrainian].
- [7] Maksimenko, O.P., Leiko O.E. (2005) *Osnovy tribologii [Fundamentals of tribology]* Navch. posibnik. Dniprodzerzhynsk: DDTU [in Ukrainian].
- [8] Tselikov, A.I., Grishkov, A.I. (1970) *Teoriya prokatki [Rolling theory]* M.: Metallurgiiia [in USSR].
- [9] Grydev, A.P. (2001) *Teoriya prokatki [Rolling theory]* Izd. 2 perer. i dop. M.: SP Internet Inzhinirinh [in Ukrainian].
- [10] Kodnir, D.S. (1963) *Kontaktno-gidrodinamicheskaia teoriia smazki [Contact hydrodynamic theory of lubrication]*. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatelstvo [in USSR].

- [11] Petrusevich, A.I. (1951) *Osnovnye vyvody iz kontaktno-gidrodinamicheskoi teorii smazki* [Main conclusions from the contact-hydrodynamic theory of lubrication]. *Izvestiia AN SSSR. ONT*, 2. [in USSR].
- [12] Kragelskii, I.V., Alisina V.V. (1979) *Trenie, iznashyvanie i smazka* [Friction, wear and lubrication] *spravochnik*. (Vols. 1-2) M.: Mashinostroenie [in USSR].

Надійшла до редколегії 14.11.2022