

УДК 621.771.01

Р. Я. РОМАНЮК, К. О. ЛЕВЧУК, Ю. А. ГАСИЛО

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ЕПЮР КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ
ПРИ ТОНКОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ

Проаналізовано відомі в теорії прокатки моделі тертя в осередку деформації Кулона та Зібеля. Як показують дослідження, вони дають суттєві похибки при прогнозуванні розподілу контактних напружень при тонколистовій прокатці. Запропонована модель тертя, яка відрізняється лінійним переходом від максимальних значень напружень тертя до мінімальних. Ця модель дозволяє з достатньою точністю отримати теоретичний розподіл по осередку деформації нормальних контактних напружень та напружень тертя і визначити середнє нормальне контактне напруження при гарячій та холодній тонколистовій прокатці.

Ключові слова: модель тертя, епюра, контактні напруження, осередок деформації, кут нейтрального перетину, тонколистова прокатка.

Проанализированы известные в теории прокатки модели трения в очаге деформации Кулона и Зибеля. Как показывают исследования, они дают существенные погрешности при прогнозировании распределения контактных напряжений при тонколистовой прокатке. Предложена модель трения, которая отличается линейным переходом от максимальных значений напряжений трения к минимальным. Эта модель позволяет с достаточной точностью получить теоретическое распределение по очагу деформации нормальных контактных напряжений и напряжений трения и определить среднее нормальное контактное напряжение при горячей и холодной тонколистовой прокатке.

Ключевые слова: модель трения, эпюра, контактные напряжения, очаг деформации, угол нейтрального сечения, тонколистовая прокатка.

Rollings models of a friction known in the theory in the byte of deformation Kulon and Zibel are analyses. As show explorations, they give essential lapses at forecasting of distribution contact voltages at thin sheet rolling. It leads not to exact definition of an average normal contact voltage, forces, the moment, power of deformation. The sample piece developed in works Vasileva, is grounded on Newton's law, therefore can be applied at cold thin sheet rolling with lubrications. In the given work the sample piece of a friction which differs linear transition from the maximum values of pressure of a friction to the minimum is offered. It consists of 3 sections, on two of which is carried out Kulon's regularity between contact voltages, and the third section is presented by a linear function. Thanks to it the gradient junction from the maximum values pressure of a friction to minimum is carried out, that allows with sufficient accuracy to gain theoretical distribution on the byte of deformation normal contact voltages and pressure of a friction and to define an average normal contact voltage at hot and cold thin sheet rolling in conditions when the differential equation of the Karman is carried out. Usability of a sample piece is proved by comparison of theoretical orthographic eures contact voltages built with use of given dependence, and experimental, gained by means of known methods in the scientific literature.

Keywords: model of friction, orthographic eure, contact voltages, byte of deformation, angle of neutral cross-section, thin sheet rolling.

Вступ. При моделюванні контактних напружень p_x та t_x в процесі прокатки використовується диференційне рівняння рівноваги Т. Кармана. Для його вирішення необхідно знати залежність між нормальними контактними напруженнями та напруженнями тертя.

З цією метою в [1, 2] наведено кулонівська та зібелівська моделі тертя, а також формули за якими можна побудувати розподіл контактних напружень

по довжині зони контакту, використовуючи ці залежності.

Однак, як показують різні дослідження, зокрема, приведені в [3], отримані епюри кількісно не відповідають експериментальним, а є завищеними. Це пояснюється утворенням піку на графіку p_x , оскільки напруження t_x різко змінюють знак в нейтральному перетині осередку деформації γ (рис. 1).

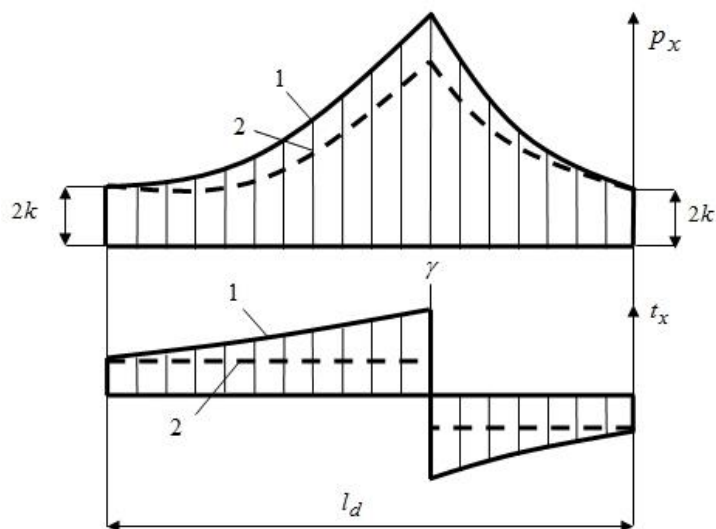


Рис. 1 – Епюри розподілу контактних напружень при моделях тертя: 1 – Кулона та 2 – Зібеля

В роботах [3, 4] запропонована модель тертя, яка є наближеною до закону Ньютона, тому може застосовуватися при холодній тонколистовій прокатці зі змащенням. Як показують дослідження, наведені в цих роботах, застосування цієї моделі дає достовірні дані з розподілу контактних напружень та визначення енергосилових параметрів деформації.

В дослідженнях [5, 6] розроблена нова залежність між контактними напруженнями, яка може використовуватися у випадках тонколистової прокатки (гарячої та холодної), коли справедливе рівняння Г. Кармана.

Постановка задачі. Метою роботи є аналіз та обґрунтування доцільності використання запропонованої в роботах [5, 6] нової моделі тертя для прогнозування розподілу контактних напружень p_x та t_x при гарячій та холодній тонколистовій прокатці.

Результати роботи. Вищезгадана залежність включає 3 ділянки (рис. 2): на двох з них виконується кулонівська закономірність між p_x та t_x , а третя ділянка описується наступною лінійною функцією:

$$\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, \quad (1)$$

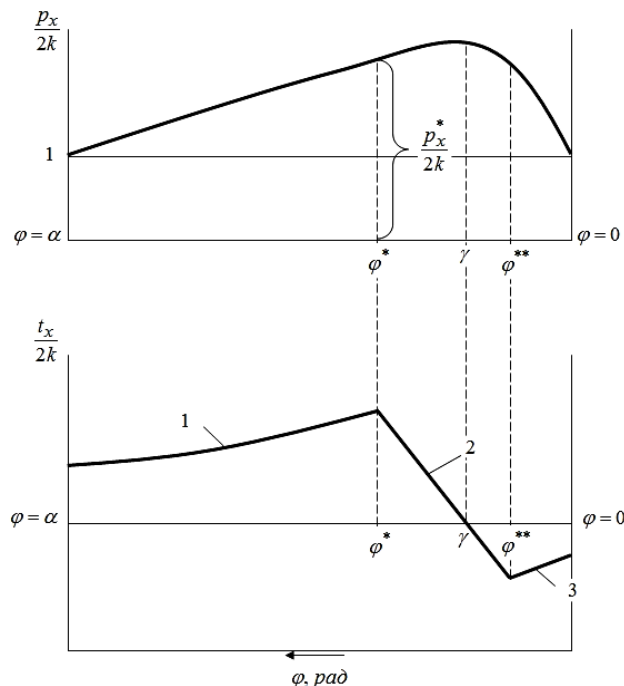


Рис. 2 – Модель тертя з урахуванням лінійного переходу від максимальних значень напружень тертя до мінімальних

де f_y – коефіцієнт тертя в зонах ковзання осередку деформації;

φ^* – кут, що відповідає перетину переходу від

моделі $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{p_x}{2k}$, яка діє в зоні відставання, до кривої, яка описує зону лінійного переходу або прилипання (1);

$\frac{p_x^*}{2k}$ – безрозмірний тиск в перетині φ^* .

Коефіцієнт тертя f_y попередньо приймається, а потім при ітерації його значення уточнюється.

В загальному випадку запропонована модель тертя має наступний вигляд:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \alpha_y > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{p_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (2)$$

де φ^{**} – кут, що відповідає перетину переходу від моделі $\frac{t_x}{2k} = -f_y \frac{p_x}{2k}$, яка діє в зоні випередження, до кривої, яка описує зону прилипання (1).

Вираз (2) дозволяє забезпечити лінійний перехід від позитивних значень напружень тертя до негативних.

Перетини φ^* та φ^{**} обираються ітераційним шляхом за допомогою ЕОМ при виконанні наступних умов:

– величина напружень тертя в безрозмірній формі не повинна перевищувати 0,5, тобто:

$$-0,5 \leq \frac{t_x}{2k} \leq 0,5$$

– середній коефіцієнт тертя, визначений по ешпорам контактних напружень за формулою:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^{\alpha_y} \frac{t_x}{2k} d\varphi}{\int_0^{\alpha_y} \frac{p_x}{2k} d\varphi}, \quad (3)$$

повинен дорівнювати коефіцієнту тертя f_y , який є в осередку деформації, тобто визначений за допомогою відомих емпіричних формул [1, 2, 3].

Дослідження Я. Д. Василева показують, що при тонколистовій прокатці, коли $\frac{l_d}{h_{cp}} > 3-4$, доцільно використовувати для розрахунку середнього коефіцієнту тертя, наприклад, наступну формулу [3]:

$$f_{cp} = \frac{t_{cp}}{p_{cp}} \frac{\left(\frac{h_\gamma}{h_1} - \frac{h_\gamma}{h_0}\right)}{\left[\left(1 - \frac{h_\gamma}{h_0}\right)\left(1 - \frac{l_{on}}{l}\right) + S \frac{l_{on}}{l}\right]} \quad (4)$$

Послідовність побудови епюр нормального контактного напруження (рис. 2) наступна:

1. Підставляємо вираз $\frac{t_x}{2k} = \pm f_y \frac{p_x}{2k}$ в диференційне рівняння рівноваги Т. Кармана та, розв'язуючи його методом послідовних наближень Рунге-Кутта для зон відставання та випередження (з урахуванням знаку), отримуємо криві розподілу нормального контактного напруження (зони 1 та 3).

2. Для з'єднання цих зон лінійною функцією точно вирішуємо рівняння Т. Кармана. Підставляючи вираз (1) в рівняння рівноваги, маємо:

$$\frac{dp_x}{2k} = \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\operatorname{tg} \varphi}\right) \frac{dh_x}{h_x}$$

Попередньо визначимо dh_x :

$$h_x = h_1 + R\varphi^2;$$

$$dh_x = 2R\varphi d\varphi.$$

Приймаємо $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$, тоді:

$$\frac{dp_x}{2k} = \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi}\right) \frac{dh_x}{h_x} \quad (5)$$

Проінтегруємо обидві частини виразу (5):

$$\frac{p_x}{2k} = \int \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi}\right) \frac{dh_x}{h_x} d\varphi = \int \frac{dh_x}{h_x} d\varphi - \int \frac{f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \frac{dh_x}{h_x} d\varphi + \int \frac{f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \frac{dh_x}{h_x} d\varphi.$$

Отримуємо остаточно:

$$\frac{p_x}{2k} = \ln|h_x| - f_y \frac{p_x}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \ln|h_x| + 2f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{1}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \operatorname{arctg} \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + c_1. \quad (6)$$

Постійну c_1 знайдемо з відомої граничної умови в перетині φ^* .

При $\varphi = \varphi^*$, $p_x = p_x^*$ та $h_x = h_x^*$, тоді:

$$c_1 = -\ln|h_x^*| + f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \ln|h_x^*| - 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \times \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{1}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \operatorname{arctg} \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + \frac{p_x^*}{2k}.$$

Підставляючи c_1 в (6) остаточно отримуємо:

$$\frac{p_x}{2k} = \ln \left| \frac{h_x}{h_x^*} \right| \left(1 - f_y \frac{p_x}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma}\right) + 2f_y \frac{p_x}{2k} \times \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{h_1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} - \operatorname{arctg} \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \right) + \frac{p_x}{2k}.$$

Значення кута нейтрального перетину отримуємо з відомої граничної умови в перетині φ^{**} .

При $\varphi = \varphi^{**}$, $p_x = p_x^{**}$ та $h_x = h_x^{**}$, тоді:

$$\varphi = \frac{\left(\frac{p_x^{**}}{2k} - \frac{p_x^*}{2k} - \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right| \right) + f_y \frac{p_x^*}{2k} \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right|}{\left[2f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{h_1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\varphi^{**}}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} - \operatorname{arctg} \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \right) + \frac{p_x^{**}}{2k} - \frac{p_x^*}{2k} - \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right| \right]}.$$

Таким чином, при вихідних умовах h_1 , R , f_y та α_y , задаючи попередньо перетини φ^* та φ^{**} , отримуємо епюри нормального контактного напруження, а потім і напруження тертя, використовуючи вираз (2).

Далі визначаємо значення середнього коефіцієнту тертя по епюрам за формулами (3) або (4). Якщо отриманий коефіцієнт тертя не відповідає необхідному значенню, змінюємо перетини φ^* та φ^{**} .

Використовуючи ЕОМ, побудова епюр контактних напружень за приведеним алгоритмом є нескладною і проводиться, як правило, за 6–10 ітерацій.

Слід зазначити, що урахування натягів (передній та задній) здійснюється підстановкою їх безрозмірних значень в граничні умови при вирішенні диференційного рівняння Т. Кармана:

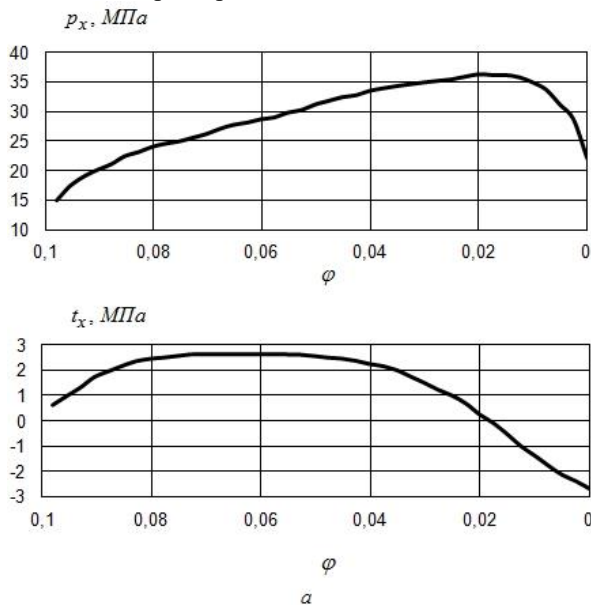
– в перетині входження в осередок деформації

$$\frac{p_x}{2k} = 1 - \frac{q_0}{2k};$$

– в перетині виходу металу з валків

$$\frac{p_x}{2k} = 1 - \frac{q_1}{2k},$$

де $\frac{q_0}{2k}$ та $\frac{q_1}{2k}$ – відповідно питомі задній та передній натяги в безрозмірних значеннях.



Для визначення доцільності використання моделі тертя (2) для прогнозування розподілу контактних напружень, проведемо порівняння експериментальних епюр з теоретичними, побудованими з використанням запропонованої залежності (рис. 3). Умови, за якими були отримані експериментальні епюри контактних напружень, наведено в табл. 1 [7]. В цих дослідях натяги були відсутні.

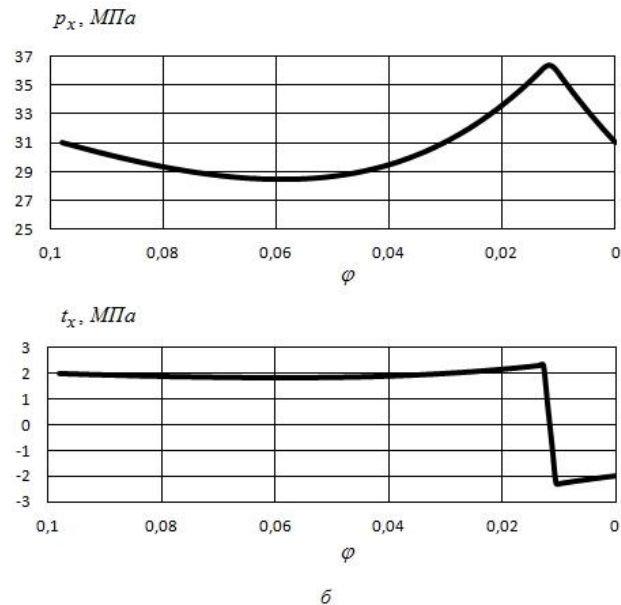


Рис. 3 – Порівняння епюр контактних напружень: а – експериментальні, б – теоретичні

Таблиця 1 – Умови, за якими були отримані експериментальні епюри контактних напружень

Товщина зразків, мм		Ширина зразків b , мм	Діаметр валків D , мм	Кут захвату α_y , рад	Параметр форми $\frac{l_d}{h_{cp}}$	Середній коефіцієнт тертя в осередку деформації f_{cp}	Матеріал зразків
h_0	h_1						
2	1	50	208	0,098	7	0,064	свинець

З наведених графіків випливає, що якісно вони відрізняються, оскільки при теоретичній побудові приймаються наступні припущення: усереднюється напруження текучості по дузі контакту та на границях осередку деформації нормальне контактне напруження дорівнює примусовій межі текучості (при деформації без натягів). Але кількісно теоретичний розподіл p_x та t_x є задовільним і різниця при визначенні середнього нормального контактного напруження у порівнянні з експериментальною епюрою не перевищує 5 %.

Аналогічні висновки можна зробити і при моделюванні контактних напружень з натягами [6].

Тому запропонована модель може використовуватися для прогнозування розподілу контактних напружень при гарячій та холодній тонколистовій прокатці.

Висновки. Відомі в теорії моделі тертя Кулона і Зібеля дають значні похибки при моделюванні розподілу контактних напружень при холодній тонколистовій прокатці та визначенні середнього

нормального контактного напруження. Це пояснюється утворенням піку на графіку контактних нормальних напружень, оскільки напруження тертя різко змінюють знак в нейтральному перетині осередку деформації.

Запропонована модель тертя, яка усуває ці недоліки. Вона складається з 3 ділянок, на двох з яких виконується кулонівська закономірність між контактними напруженнями, а третя ділянка описується лінійною функцією, завдяки чому здійснюється плавний перехід від максимальних значень напружень тертя до мінімальних, що дозволяє більш точно (з похибкою не більше 5–10 %) визначити значення середнього нормального контактного напруження при гарячій та холодній тонколистовій прокатці в умовах, коли справедливе рівняння Т. Кармана.

Список літератури

1. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

2. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
3. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
4. Василев Я. Д. Определение контактных напряжений при тонколистовой прокатке / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Деметиненко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2002. – С. 277–283.
5. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки по эпюрам контактных напряжений / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №2. – С. 110–114.
6. Романюк Р. Я. Підвищення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки на основі розвитку теоретичних положень щодо контактної взаємодії полоси з валками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.05 “Процеси та машини обробки тиском” / Р. Я. Романюк. – Дніпропетровськ, 2012. – 19 с.
7. Клименко П. Л. Контактные напряжения при прокатке с технологической смазкой / П. Л. Клименко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: “Системні технології”. – 2005. – С. 44–49.
4. Vasilev Ja. D., Konovodov D. V., Dementienko A. V. Opredelenie kontaktnyh naprjazhenij pri tonkolistovoj prokatke [Definition of contact voltages at sheet rolling]. Udoskonalennya protsesiv i obladnannya obrobky tyskom v metalurhiji i mashynobuduvanni: tematych. zb. nauk. prats' [Improvement of processes and equipment for pressure treatment in metallurgy and machine-building: topics. save sciences works]. Kramatorsk, DDMA Publ., 2002, pp. 277–283.
5. Maksimenko O. P., Romanjuk R. Ja. Ocenka ustojchivosti processa prokatki po jepjuram kontaktnyh naprjazhenij [Estimation of stability process of rolling on orthographic epures of contact voltages]. Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. 2010, no. 2, pp. 110–114.
6. Romanyuk R. Ya. Pidvyshchennya pozdovzhn'oyi stalosti protsesu tonkolystovoyi prokatky na osnovi rozvytku teoretichnykh polozhen' shchodo kontaktnoyi vzayemodiyi polosy z valkamy: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.03.05 “Protsey ta mashyny obrobky tyskom” [Enhancement of sheet gauge rolling process longitudinal steadiness based on development of theoretical representations of sheet and roll interaction. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.03.05 “Processes and pressure treatment cars”]. Dnipropetrovs'k, 2012. 19 p.
7. Klimenko P. L. Kontaktnye naprjazhenija pri prokatke s tehnologicheskoy smazkoj [Contact voltages at rolling with technological lubrication]. Suchasni problemy metalurhiji. Naukovi visti. Plastychna deformatsiya metaliv. [Modern problems of metallurgy. Scientific messages. A flowage of metals]. Dnipropetrovs'k, Systemni tekhnolohiji Publ., 2005, t. 8, pp. 44–49.

Bibliography (transliterated)

1. Grudev A. P. Teoriya prokatki [The rolling theory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988. 240 p.
2. Celikov A. I., Nikitin G. S., Rokotjan S. E. Teoriya prodol'noj prokatki [The lengthwise rolling theory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980. 320 p.
3. Vasylev Ya. D., Minayev O. A. Teoriya pozdovzhn'oyi prokatky [The lengthwise rolling theory]. Donetsk, UNITEKH Publ., 2009. 488 p.

Надійшла (received) 12.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Прогнозування теоретичних епюр контактних напружень при тонколистовій прокатці / Р. Я. Романюк, К. О. Левчук, Ю. А. Гасило // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 71–76. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

Прогнозирование теоретических эпюр контактных напряжений при тонколистовой прокатке / Р. Я. Романюк, Е. А. Левчук, Ю. А. Гасило // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 71–76. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

Forecasting of theoretical orthographic epures of contact voltages at thin sheet rolling / R. Ja. Romaniuk, K. O. Levchuk, Yu. A. Hasylo // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 71–76. – Bibl.: 7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Романюк Роман Ярославович – кандидат технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності; тел.: (067) 100-66-64; e-mail: r22roma@i.ua

Романюк Роман Ярославович – кандидат технических наук, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности; тел.: (067) 100-66-64; e-mail: r22roma@i.ua

Romaniuk Roman Yaroslavovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Labour safeties and safeties of ability to live; tel.: (067) 100-66-64; e-mail: r22roma@i.ua

Левчук Катерина Олександрівна – кандидат економічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності; тел.: (067) 100-66-64

Левчук Екатерина Александровна – кандидат экономических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности; тел.: (067) 100-66-64

Levchuk Kateryna Oleksandrivna – Candidate of Economic Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Labour safeties and safeties of ability to live; tel.: (067) 100-66-64

Гасило Юрій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри технології та устаткування зварювання; тел.: (097) 508-32-94

Гасило Юрій Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры технологии и оборудование сварки; тел.: (097) 508-32-94

Hasylo Yuri Anatolevych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of technology and the welding equipment; (097) 508-32-94