

УДК621.771.23

Р.Я. Романюк, к.т.н., доцент

К.О. Левчук, к.е.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ТОНКОЛИСТОВОЇ ПРОКАТКИ ЗА РІЗНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРТЯ

Проаналізовано розподіл горизонтальних контактних та внутрішніх сил по осередку деформації, які визначені за різних моделей тертя. Наведена блок-схема алгоритму оцінки поздовжньої сталості процесу деформації. Уточнена умова настання граничного випадку деформації при простому процесі тонколистової прокатки.

Ключові слова: внутрішня сила, осередок деформації, контактні напруження, показник сталості, моделювання.

The distribution of horizontal contact and internal forces in the deformation zone, which are determined for various models of friction, is analyzed. A block diagram of the algorithm for estimating the longitudinal stability of the deformation process is given. The condition for the occurrence of a limiting case of deformation during a simple sheet metal rolling process has been clarified.

Keywords: internal force, deformation zone, contact stresses, stability index, modeling.

Постановка проблеми

Одним з важливих технологічних параметрів, що визначає сталість процесу прокатки, є захоплююча здатність валків. Розрізняють умови захвату металу робочим інструментом в початковий момент при торканні кромки штаби з валками та в сталому режимі.

Забезпечення надійного та стабільного захвату — обов'язкова умова створення раціонального технологічного процесу. Збільшення захоплюючої здатності валків дозволяє не тільки підвищити продуктивність прокатних станів, але і поліпшити оброблюваність металу, що зменшить кількість внутрішніх дефектів.

Порушення поздовжньої сталості процесу прокатки призводить до буксування штаби у валках, а у ряді випадків є причиною великих аварій на прокатних станах.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показують, що відома в теорії прокатки умова захоплення металу валками в сталому режимі не завжди вірно відображає реальну картину поздовжньої сталості, навіть, простого процесу деформації. Дослідами встановлено, що на граничний кут захоплення в сталому режимі здійснюють вплив не тільки умови тертя на контактні інструменту з металом, але і геометричні параметри та деформований стан штаби в осередку деформації.

Крім цього, як відомо, процес тонколистової прокатки протікає з натягами (переднім та заднім). Тому оперувати умовою захоплення, яка використовується для простого процесу прокатки, як показником сталості в даному випадку, є не доцільним.

З усього вищенаведеного можна зробити висновок, що подальший розвиток питання захоплення штаби валками при тонколистовій прокатці є актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [1—2] розроблені методики визначення результуючих горизонтальних контактних і внутрішніх сил, які діють в осередку деформації. На основі цих сил можна теоретично спрогнозувати сталість процесу прокатки в поздовжньому напрямку.

При сталій прокатці на контактні металу з валками у кожному перетині осередку деформації діє горизонтальна сила Q_x^* , яка врівноважується горизонтальною внутрішньою силою $Q_{x\text{вн}}^*$. Остання викликана напруженнями від пластичної деформації металу. При цьому, сила Q_x^* спрямована за напрямом прокатки та сприяє його стійкому протіканню.

Вихідними даними для розрахунку сил Q_x^* та $Q_{xвн}^*$ є епюри розподілу контактних напружень по осередку деформації, які теоретично можуть бути отримані при рішенні рівняння рівноваги Т. Кармана з урахуванням прийнятої моделі тертя. У даній роботі у якості моделей тертя будуть використовуватися закони Зібеля, Кулона [3], а також моделі, розроблені в роботах [4—6].

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в аналізі розподілу результуючих горизонтальних контактних і внутрішніх сил, які отримані при обробці теоретичних епюр контактних напружень за різних моделей тертя в осередку деформації, а також вивченні впливу внутрішніх сил на граничний кут захоплення в сталому режимі при тонколистовій прокатці.

Виклад основного матеріалу

Використовуючи методіку, розроблену в роботі [1], побудуємо епюри розподілу результуючої горизонтальної контактної сили Q_x^* по довжині осередку деформації для згаданих вище моделей тертя за наступних умов: $R = 300$ мм, $h_0 = 0,3$ мм, $\alpha_y = 0,017$ рад та $f_y = 0,044$ (R — радіус валків, h_0 — початкова товщина штаби, α_y — кут захоплення в сталому режимі, f_y — коефіцієнт тертя в сталому режимі). Для зручності аналізу усі розрахунки виконані у безрозмірній формі. Графіки розподілу сили Q_x^* наведені на рис. 1.

З графіків зміни результуючої горизонтальної контактної сили випливає, що на межах зони контакту штаби з валками ця сила дорівнює нулю. Це свідчить про стаціонарність процесу прокатки. Вздовж довжини осередку деформації дана сила змінюється за певним законом, отже, можна одержати середнє її значення за формулою:

$$K_{ст} = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} Q_x^* d\varphi. \quad (1)$$

Даний параметр сигналізує про сталість процесу прокатки та називається показником (критерієм) сталості [7].

Як випливає з наведених графіків, для заданих умов прокатки за різних моделей тертя на контактні показник $K_{ст}$ позитивний, що свідчить про сталість процесу прокатки.

Далі проаналізуємо, як змінюються внутрішні сили для вищенаведених умов деформації. Розрахунки будемо проводити за методікою, яка наведена в роботі [2]. Результати розрахунку розподілу горизонтальної внутрішньої сили $Q_{xвн}^*$ по осередку деформації у безрозмірних величинах наведено на рис. 2.

Порівнюючи відповідні графіки (рис. 1 та 2), можна зробити висновок, що у кожному перетині осередку деформації виконується наступна рівність:

$$2Q_x^* = Q_{xвн}^*, \quad (2)$$

отже, і середні значення цих сил також співвідносяться аналогічно.

Коефіцієнт 2 в даній формулі пояснюється дією контактних сил зі сторони обох валків.

З останньої рівності випливає, що в рівновазі металу у валках приймають участь і внутрішні сили. Крім того відмітимо, що сила Q_x^* спрямована у бік руху штаби і є активною, а $Q_{xвн}^*$ — у протилежну сторону. Таким чином, відзначимо, що втягуючі метал у валки сили в осередку деформації витрачаються не лише на подолання виштовхуючих, але і на врівноважування внутрішніх сил. У такому випадку на захоплюючу здатність валків у сталому режимі повинні впливати і внутрішні сили деформованого металу.

Проаналізуємо це питання більш докладно.

Як відомо, в теорії прокатки прийнято, що граничні умови захоплення при простому процесі визначаються наступною рівністю:

$$\alpha_y^{\max} = 2f_y. \quad (3)$$

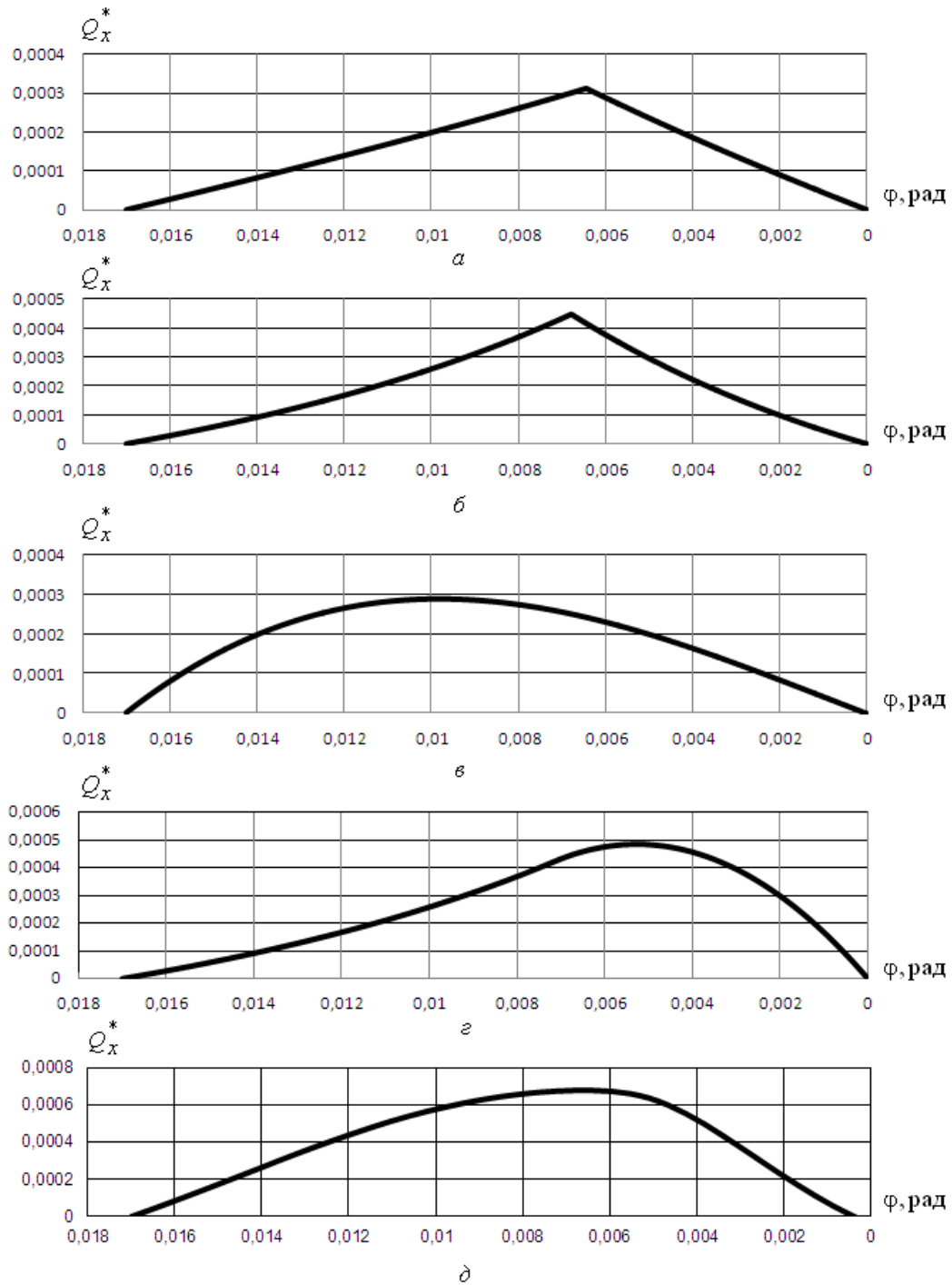


Рис. 1. Епюри розподілу по осередку деформації горизонтальної контактної сили за різних моделей тертя: а — модель Зібеля; б — модель Кулона; в — гідродинамічна модель, розроблена в роботі [4]; з — модель, розроблена в роботі [5]; д — модель, розроблена Я. Д. Василевим [6]

Однак, експериментальні дані ряду дослідників дають підставу вважати, що дана умова не виконується. Результати цих досліджень наведено в роботі [8].

Так, в дослідях А. А. Преснякова при прокатці зливків нікелю відношення $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ дорівнювало 1,16, а при деформації міді — 1,22.

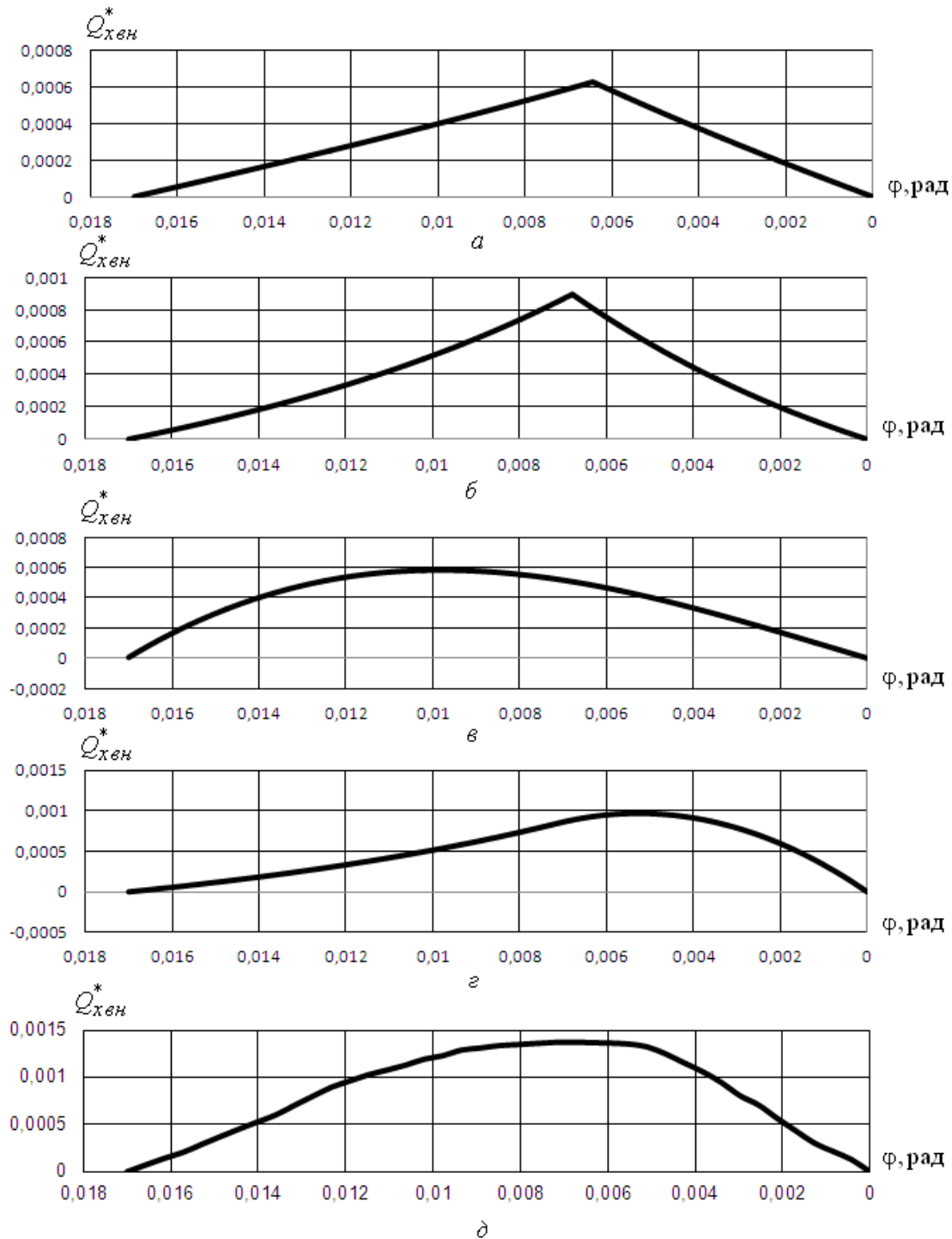


Рис. 2. Епюри розподілу по осередку деформації горизонтальної внутрішньої сили за різних моделей тертя: *а* — модель Зібеля; *б* — модель Кулона; *в* — гідродинамічна модель, розроблена в роботі [4]; *г* — модель, розроблена в роботі [5]; *д* — модель, розроблена Я. Д. Василевим [6]

В експериментах, які проводилися С. В. Макаєвим на блюмінгу 1150 Ново-Тагільського металургійного заводу, прокатували сталеві зливки на гладкій бочці та в калібрах. За результатами цих дослідів величина $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ змінювалася в межах 1,25—1,35.

В дослідженнях П. Б. Бахтінова при прокатці блюмів у валках з катаючим діаметром 886 мм, відношення $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ складало 1,37 при звичайному захопленні та 1,42 — з попереднім обтисненням на конус.

Також відомі експерименти О. П. Грудєва та Ю. В. Зільберга, в яких досліджували захоплюючу здатність валків у лабораторних умовах. Досліди проводили на двохвалковому стані 180 зі швидкістю прокатки 0,3 м/с. Максимальний кут захоплення визначали шляхом прокатки свинцевих ступінчасто-клиноподібних зразків за величиною обтиснення, при якому виникають перші пробуксовки. Кінцева товщина штаб змінювалась в межах від 0,5 мм до 50 мм, відповідно і підбирали початкову товщину зразків. Результати дослідів показали, що відношення $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ знаходилося в межах 1,5—1,9.

В дослідях І. Я. Тарновського, О. О. Поздєєва та В. В. Ляшкова при прокатці клиноподібних та прямокутних свинцевих зразків було отримано відношення $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y} = 1,4—1,45$.

З приводу невідповідності теоретичної умови захоплення практичним даним дослідники висловлюють різні припущення. Зокрема припускається, що коефіцієнт тертя в сталому процесі прокатки істотно відрізняється від коефіцієнт тертя в початковий момент захоплення, хоча не наводиться переконливих даних на користь такого припущення.

Використовуючи показник сталості (1) та модель тертя, розроблену в роботі [5], були визначені граничні умови прокатки в залежності від кінцевої товщини штаби за різних коефіцієнтів тертя на контакті металу з валками. Результати розрахунків наведені на рис. 3.

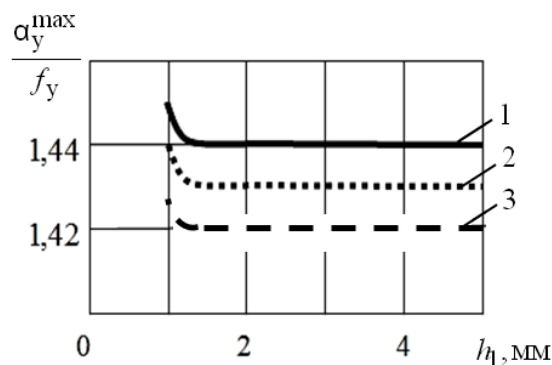


Рис. 3. Залежність відношення $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ від товщини штаби за різних коефіцієнтів тертя:

1 — $f_y = 0,05—0,15$; 2 — $f_y = 0,2$; 3 — $f_y = 0,3$

Як випливає з даних графіків, відношення $\frac{\alpha_y^{\max}}{f_y}$ знаходиться у межах 1,42—1,44, що відповідає дослідним даним.

Необхідно відмітити, що зі збільшенням коефіцієнта тертя це відношення зменшується, а від кінцевої товщини штаби — майже не залежить.

Отже, визначення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки за допомогою показника сталості (1) дозволяє достовірно (з похибкою до 5 %) спрогнозувати умови сталого його ведення за різних умов тертя (зі змащенням та без нього, в режимі гідродинамічного тертя тощо).

На рис. 4 наведено блок-схему алгоритму даної методики.

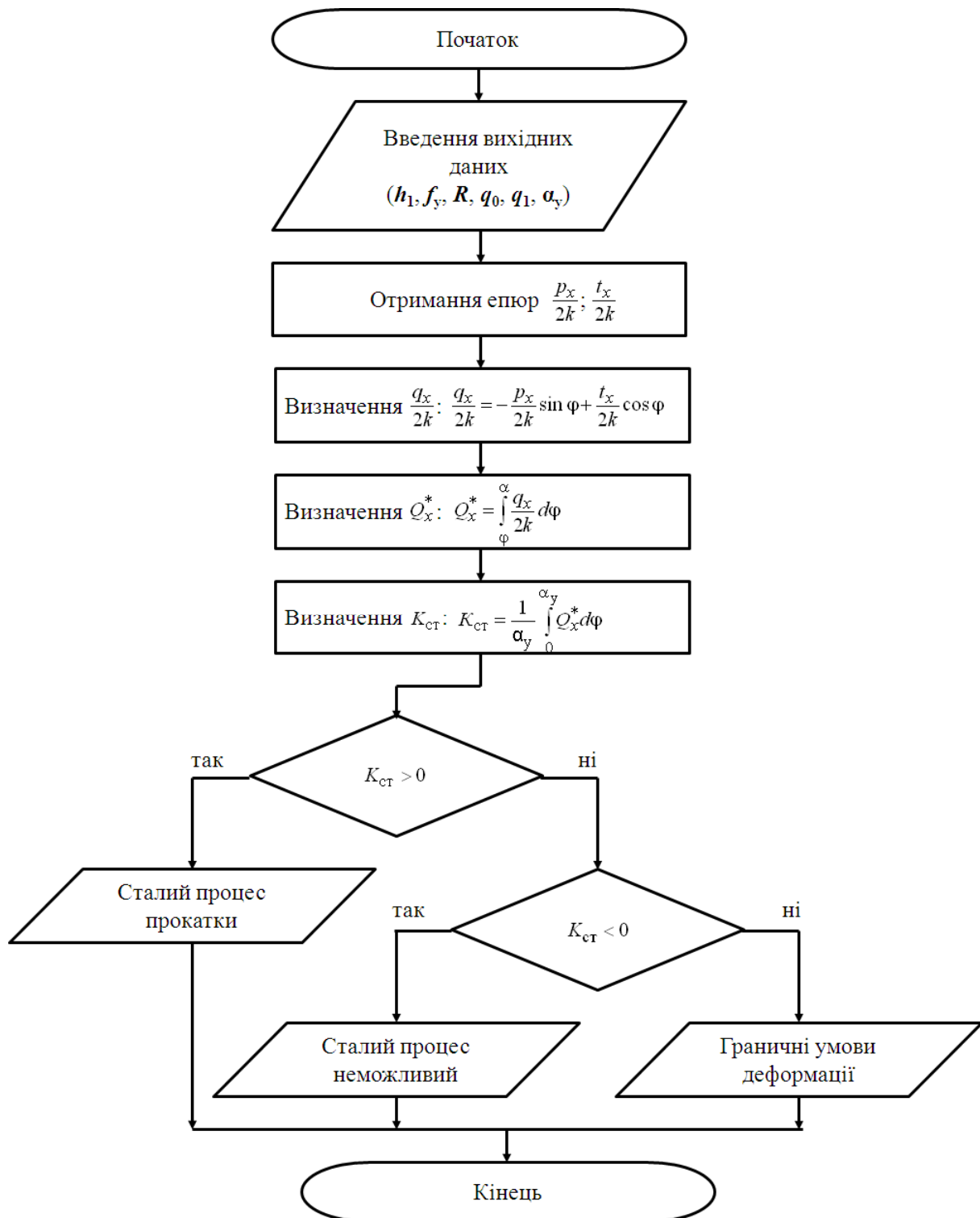


Рис. 4. Блок-схему алгоритму визначення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки

Висновки

Проаналізовано розподіл по осередку деформації результуючих горизонтальних контактних і внутрішніх сил, які отримані при обробці теоретичних епюр контактних напружень за різних моделей тертя. Показано, що в зоні контакту металу з валками результуючі горизонта-

льні контактні сили врівноважуються внутрішніми, які викликані пластичною деформацією металу. Наведено блок-схему алгоритму визначення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки.

Теоретично досліджена та уточнена умова захоплення металу валками в сталому режимі прокатки без натягів. Показано, що відношення максимального кута захоплення до коефіцієнта тертя в осередку деформації дорівнює 1,42—1,44, що підтверджується результатами експериментів ряду дослідників. Зниження захоплюючої здатності валків, на відміну від загальновідомої теоретичної умови (3), пояснюється врахуванням внутрішніх сил.

Список використаної літератури

1. Максименко О. П., Романюк Р. Я. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2009. № 10. С. 22–24.
2. Максименко О. П., Романюк Р. Я. Анализ равновесия сил в очаге деформации при простом процессе прокатки. *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Серія машинобудування. 2010. №59. С.161–164.
3. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки: підручник. Донецьк: УНІТЕХ, 2009. 488 с.
4. Максименко О. П., Романюк Р. Я. Теоретическое исследование процесса прокатки с отставанием металла в очаге деформации. *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Серія машинобудування. 2010. №60. С.159–162.
5. Романюк Р. Я., Левчук К. О., Гасило Ю. А. Прогнозування теоретичних епіюр контактних напружень при тонколистовій прокатці. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ” : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2017. № 37. С.71–76.
6. Определение нейтрального угла при холодной прокатке с использованием уточнённой модели напряжений трения / Василев Я. Д. и др. *Обработка металлов давлением*. 2013. № 3(36). С. 81–85.
7. 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: 05.03.05. Дніпропетровськ, 2012. 19 с.
8. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков. Москва : СП Интернет Инжиниринг, 1998. 283 с.

FORECASTING THE LONGITUDINAL STABILITY OF THE THIN SHEET ROLLING PROCESS WITH DIFFERENT FRICTION MODELS

Romaniuk R.Ya., Levchuk K.O.

Abstract

One of the important technological parameters that determine the stability of the rolling process is the exciting ability of the rolls. Ensuring reliable and stable capture is an indispensable condition for creating a rational technological process. The increase in the exciting ability of the rolls allows not only to increase the productivity of rolling mills, but also to improve the machinability of the metal, which will reduce the number of internal defects. Violation of the longitudinal stability of the rolling process leads to slippage of the strip in the rolls, and in some cases is the cause of major accidents at rolling mills.

The results of theoretical and experimental studies show that the condition of metal capture by rolls in the steady state, which is known in the rolling theory, does not always correctly reflect the real picture of the longitudinal stability, even of a simple rolling process. Concerning the inconsistency of the theoretical conditions of seizure with practical data, the researchers express various assumptions. In particular, it is assumed that the coefficient of friction in the steady-state rolling process differs

significantly from the coefficient of friction at the initial moment of capture, although convincing evidence in favor of this assumption is not given.

The purpose of the work is to analyze the distribution of the resulting horizontal contact and internal forces, which were obtained by processing the theoretical diagrams of contact stresses for various friction models in the deformation zone, and also to study the effect of internal forces on the maximum trapping angle in steady-state of thin sheeted rolling.

The paper analyzes the appearance of the resulting horizontal contact and internal forces, which are obtained by processing the theoretical diagrams of contact stresses for various models of friction in the deformation zone. It is shown that with different models of friction in the zone of metal-roll contact, the resulting horizontal contact forces are balanced by internal forces, which are caused by plastic deformation of the metal. A block diagram of the algorithm for determining the longitudinal stability of the sheet rolling process is given.

The condition for the capture of metal by rolls in the steady state without tension is well known theoretically and clarified in the rolling theory. It is shown that the ratio of the maximum capture angle to the friction coefficient in the deformation zone is equal to 1,42—1,44, which is confirmed by the results of experiments of a number of researchers. Reducing the exciting ability of the rolls is explained to the consideration of internal forces.

References

- [1] Maksimenko O.P., Romanjuk R.Ja. [Investigation of the average resultant horizontal forces in the deformation zone]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [News of universities. Ferrous metallurgy]. Moscow, 2009, no. 10. pp. 22–24. (in Russian).
- [2] Maksimenko O.P., Romanjuk R.Ja. [Analysis of the equilibrium of forces in the deformation zone with a simple rolling process]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya mashynobuduvannia* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series of mechanical engineering]. Kiev, 2010, no. 59. pp. 161–164. (in Russian).
- [3] Vasylev Ya.D., Minaiev O.A. *Teoriia pozdovzhnoi prokatky: pidruchnyk* [Theory of longitudinal rolling: textbook]. Donetsk, 2009. 488 p.
- [4] Maksimenko O.P., Romanjuk R.Ja. [Theoretical study of the rolling process with the metal lag in the deformation zone]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya mashynobuduvannia* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series of mechanical engineering]. Kiev, 2010, no. 60. pp. 159–162. (in Russian).
- [5] Romaniuk R.Ya., Levchuk K.O., Hasylo Yu.A. [Prediction of theoretical screams of contact stresses in sheet rolling]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI": zb. nauk. prats. Seriya: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": collection of scientific works. Series: Innovative technologies and equipment for materials processing in mechanical engineering and metallurgy]. Kharkiv, 2017, no. 37. pp. 71–76. (In Ukrainian).
- [6] Vasilev Ja.D., Zavgorodnij M.I., Samokish D.N., Zamogil'nyj R.A. [Determination of the neutral angle during cold rolling using an improved model of friction stresses]. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal forming]. Kramatorsk, 2013, no. 3(36). pp. 81–85. (in Russian).
- [7] Romaniuk R.Ya. *Pidvyshchennia pozdovzhnoi stalosti protsesu tonkolystovoi prokatky na osnovi rozvytku teoretychnykh polozhen shchodo kontaktnoi vzaємodii polosy z valkamy: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: 05.03.05* [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.: 05.03.05]. Dnipropetrovsk, 2012. 19 p.
- [8] Grudev A.P. *Zahvatyvajushhaja sposobnost' prokatnyh valkov* [The gripping power of the mill rolls]. Moscow, 1998. 283 p.