Висновки. Запропонована методика визначення закономірності гальмування струменя рідини при продувці інертним газом може стати у нагоді при створенні АСК ТП МБЛЗ, яка передбачає вдування аргону у потік металу через стопор-інжектор. Окрім основних функцій продувки аргоном, що передбачають рафінування розплаву та його захист від вторинного окислення, можливе також регулювання швидкості розливання шляхом змінення параметрів продувки. Позитивний ефект на технологію безперервного розливання сталі може також бути посилений при вдуванні у струмені інертного газу порошкових інокуляторів (мікрохолодильників, модифікаторів та ін.).

ЛІТЕРАТУРА

1. Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А.В.Лейтес. – М.: Металлургия, 1984. – 200с.: ил.
2. Акименко А.Д. Исследование вынужденных и свободных циркуляционных потоков жидкого металла в непрерывном слитке на водяных моделях / А.Д.Акименко, А.А.Скворцов, А.И.Гуськов // Непрерывное литьё стали: тематический отраслевой сборник. – М.: Металлургия. – 1976. – №3. – С.48-53.
3. Исследование гидродинамики метала в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ / Е.В.Протопопов [и др.] // Новини науки Придніпров'я. – 2008. – № 3-4. – С.54-56.
4. Расчёт масштаба модели для изучения процесса распределения инокуляторов в жидкой фазе кристаллизующейся заготовки / Е.В.Синегин [и др.] // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: X Між нар. наук.-практ. конф., 2012 р.: матеріали. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С.308-321.

Надійшла до редколегії 26.02.2014.

УДК 621.771.01

РОМАНЮК Р.Я., к.т.н, ст. викладач

Дніпродзержинський державний технічний університет

СТАЛІСТЬ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ НА ОСНОВІ ДОСЛІДНИХ ЕПЮР КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ*

Вступ. В роботах [1-3] показано, що при обробці теоретичних епюр контактних напружень показником поздовжньої сталості процесу прокатки є критерій сталості K_{cm}:

$$K_{cm} = \int_0^{\alpha_y} Q_x^* d\varphi, \qquad (1)$$

розрахований з епюри розподілу сили Q_x^* (Q_x^* – поточна результуюча сила в безрозмірній формі). В залежності від величини K_{cm} процес може відбуватися в сталому режимі, без пробуксовок штаби (позитивне значення K_{cm}), здійснюватися в граничних умовах ($K_{cm} = 0$) або ж бути неможливим ($K_{cm} < 0$).

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз дослідних епюр контактних напружень, визначення розподілу сили Q_x^* при їх обробці та оцінка поздовжньої сталості процесу дослідної прокатки.

* – дослідження виконано під науковим керівництвом д.т.н., професора Максименка О.П.

Результати роботи. Відмінність визначення сталості процесу прокатки за експериментальними епюрами контактних напружень полягає в тому, що епюри отримані в розмірній формі, отже, і подальші розрахунки також проводимо в розмірній формі. При цьому показник сталості $K_{ст}$ буде характеризувати силу в осередку деформації, яка сприяє сталому процесу деформації.

В технічній літературі наведено значну кількість дослідних епюр контактних напружень [4-6], отриманих різними методами при прокатці. Розглянемо результати вимірювань контактних напружень, отриманих при деформації сталі, свинцю без використання змащення та з технологічним змащенням при різних параметрах форми $\frac{l_d}{h_{cp}}$.

Спочатку проаналізуємо дані сталої прокатки стальних зразків. В табл.1 (досліди 1-2) наведено умови деформації, за яких вимірювалися контактні напруження [4].

Таблиця 1 – Параметри прокатки при дослідженні контактних напружень

№ за/п	Товщина зразків, мм		Ширина b, мм	Діаметр валків D, мм	Кут захвату α_y, рад	Параметр форми $\frac{l_d}{h_{cp}}$	f_{cp}	Матеріал зразків	Джерело
	h_0	h_1							
1	6	4,2	50	210	0,131	2,69	0,21	сталь	[4]
2	6	4,2	50	210	0,131	2,69	0,23	сталь	[4]
3	5	1,4	49,3	210	0,185	6,1	0,13	свинець	[5]
4	4,8	1	50,2	210	0,19	6,9	0,1	свинець	[5]
5	2	1	50	208	0,098	7	0,064	свинець	[6]
6	3,2	2,2	50	208	0,103	4	0,046	свинець	[6]
7	2,2	1,2	50	208	0,103	6	0,048	свинець	[6]

На рис.1, *а*, *б* (крива 1) показано графіки розподілу нормального напруження p_x та напружень тертя t_x при прокатці стальних зразків для умов першого досліду (табл.1). Нижче представлено розподіли напружень q_x по довжині осередку деформації та поточної результуючої горизонтальних контактних сил Q_x, розраховані за формулами:

$$q_x = -p_x \sin\varphi + t_x \cos\varphi; \tag{2}$$

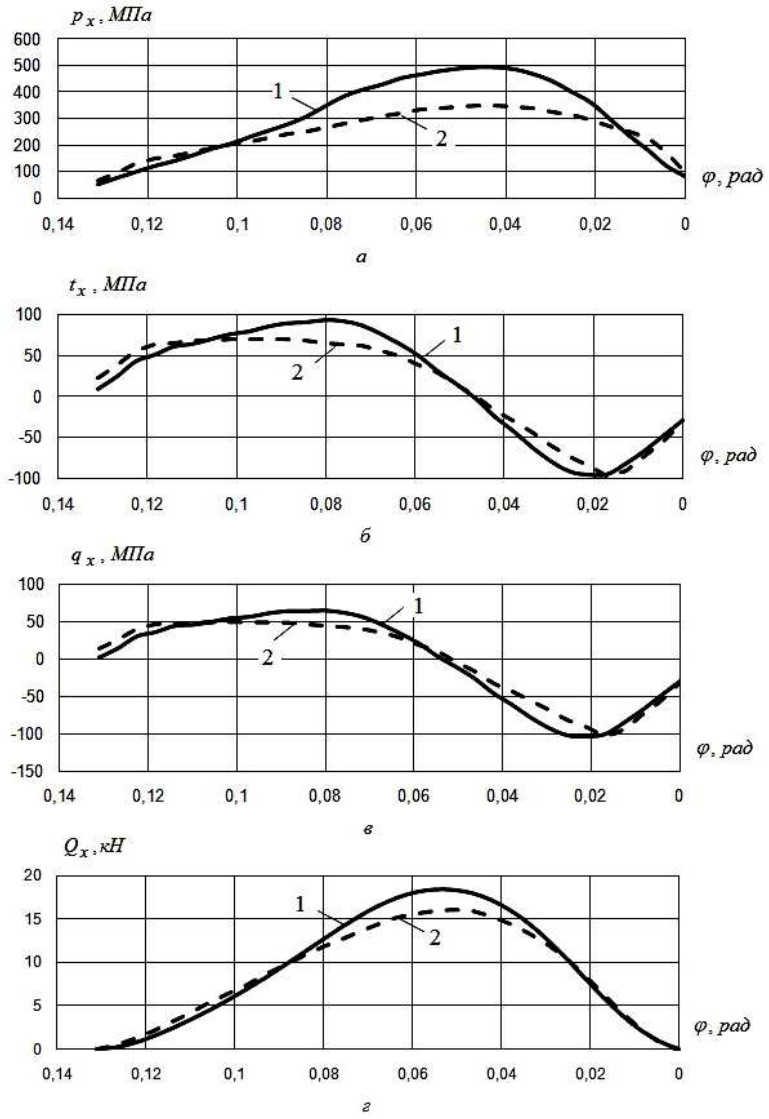
$$Q_x = Rb \int_{\varphi}^{\alpha_y} q_x d\varphi, \tag{3}$$

де Q_x – поточна результуюча сила в розмірній формі.

Відомо, що одним з критеріїв достовірності отриманих експериментальних епюр є рівність суми контактних сил нулю на виході металу з осередку деформації [7], тобто:

$$\int_{\gamma}^{\alpha} t_x \cos\varphi d\varphi - \int_{0}^{\gamma} t_x \cos\varphi d\varphi - \int_{0}^{\alpha} p_x \sin\varphi d\varphi = 0. \tag{4}$$

Як випливає з останнього графіка (рис.1, *г*, крива 1), сума контактних сил або поточна сила Q_x на виході з валків дорівнює нулю. Отже, епюри контактних напружень були перевірені автором на рівновагу сил в перетині виходу металу з осередку де-



1 – з повітряною окалиною; 2 – з товстим шаром пічної окалини

Рисунок 1 – Експериментальні епюри розподілу контактних напружень (*а*, *б*) та результати теоретичних розрахунків напружень q_x (*в*) і сили Q_x (*г*) при $\frac{l_d}{h_{cp}} = 2{,}69$ (стальні зразки)

формації, тому вони є достовірними. Слід також зазначити, що всі інші експериментальні епюри контактних напружень є також врівноваженими та достовірними.

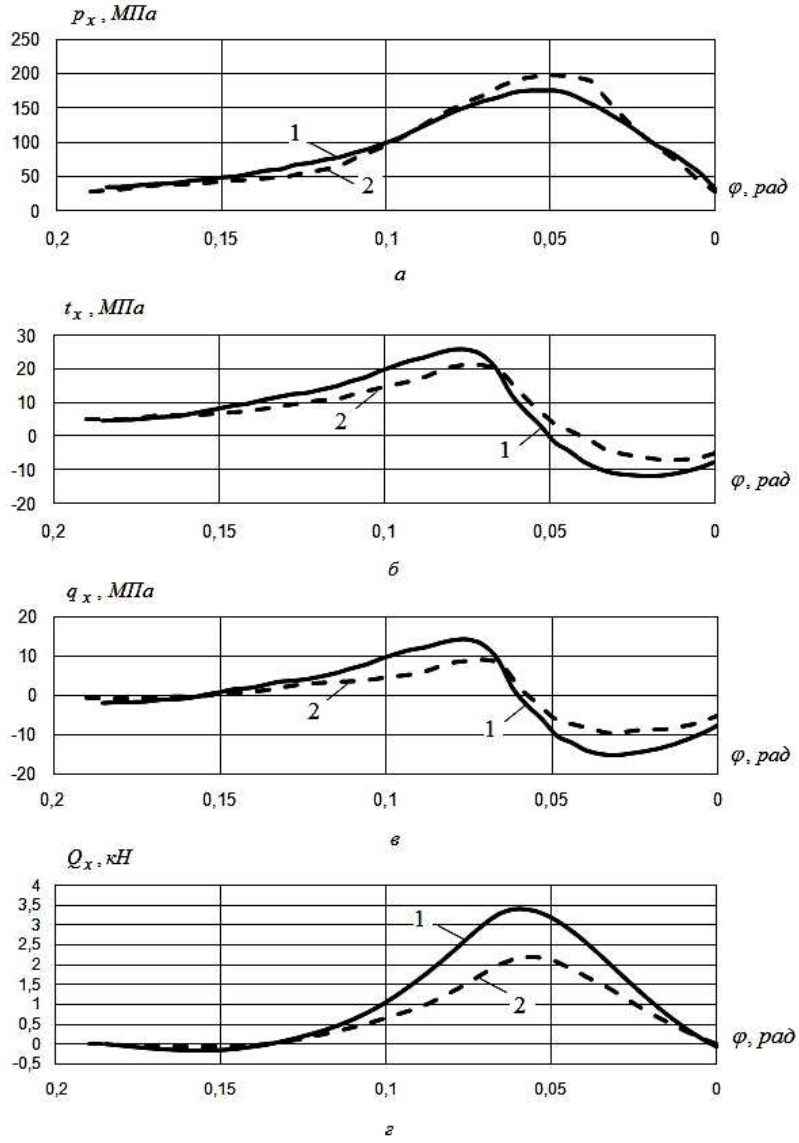
З епюри розподілу Q_x (рис.1, *г*, крива 1) випливає, що поточну результуючу горизонтальних контактних сил можна виділити і з експериментальних епюр контактних напружень. Крім цього, як видно, по всій довжині осередку деформації ця сила є позитивною, тому і критерій сталості $K_{ст}$ буде більшим від нуля.

Таким чином, як показують попередні теоретичні дослідження [1-3], в цьому випадку процес є сталим, що відповідає умовам експерименту.

На рис.1, *а*, *б* (крива 2) представлено епюри контактних напружень при прокатці сталі для умов другого досліду (табл.1). Аналогічно попередньому випадку, були розраховані епюри q_x, Q_x, наведені нижче (криві 2), та значення $K_{ст}$.

Як і в попередньому випадку, в осередку деформації діє сила Q_x, яка впродовж зони контакту є лише позитивною, тільки в перетинах входження та виходу металу з валків вона приймає нульові значення. Отже, і критерій сталості K_{cm}, розрахований з епюри розподілу Q_x, буде позитивним, тому процес протікає в сталому режимі, що також відповідає умовам досліду.

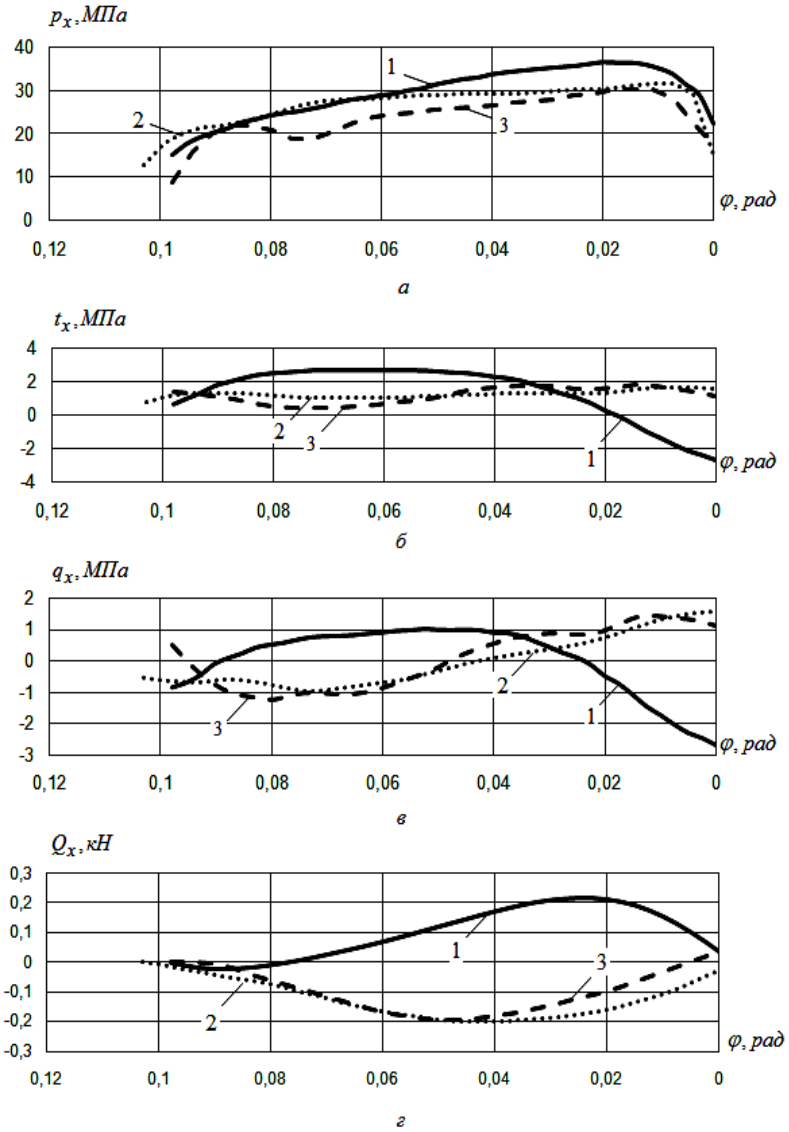
Далі розглянемо експериментальні епюри контактних напружень, отримані при деформації свинцю без застосування змащення [5]. На рис.2 наведено епюри контактних напружень та результати розрахунків q_x та Q_x при прокатці свинцю для умов дослідів 3 та 4 (табл.1).



$$1 - \frac{l_d}{h_{cp}} = 6{,}1\,;\; 2 - \frac{l_d}{h_{cp}} = 6{,}9$$

Рисунок 2 – Експериментальні епюри розподілу контактних напружень (*а*, *б*) та результати теоретичних розрахунків напружень q_x (*в*) і сили Q_x (*г*) при прокатці свинцевих зразків без змащення

Як і при прокатці сталі, деформування свинцю відбувається в сталому режимі, оскільки $K_{cm} > 0$. Це також відповідає умовам дослідів. Звернемо увагу на епюри контактних напружень, наведені на рис.2. Як видно з табл.1 (досліди 3 та 4), нормальні напруження та напруження тертя були отримані за умов, коли $\alpha_y > f_{cp}$. З теорії [8] відомо, що за цієї умови в осередку деформації виникають розтягувальні напруження на певній частині осередку деформації, а, отже, і розтягувальні сили. З епюр розподілу сил Q_x (рис.2, *г*, криві 1 та 2) видно, що на початку зони контакту вони негативні, тобто діють розтягувальні сили Q_{xnp} [3].



$$1 - \frac{l_d}{h_{cp}} = 7;\ 2 - \frac{l_d}{h_{cp}} = 4;\ 3 - \frac{l_d}{h_{cp}} = 6$$

Рисунок 3 – Експериментальні епюри розподілу контактних напружень (*а*, *б*) та результати теоретичних розрахунків напружень q_x (*в*) і сили Q_x (*г*) (свинцеві зразки зі змащенням)

Друга частина теоретичних досліджень присвячена аналізу експериментальних епюр контактних напружень при прокатці зі змащенням, які наведено в роботі [6]. Умови прокатки при проведенні дослідів наведено в табл.1 (досліди 5-7).

На рис.3, криві 1 наведено епюри контактних напружень і графіки зміни горизонтальних напружень q_x та сили Q_x по довжині зони контакту для сталого процесу прокатки свинцю з машинним маслом (дослід 5). Як видно з рис.3, *г*, крива 1, на початку осередку деформації виникає зона дії розтягувальних сил ($Q_x < 0$), оскільки $\alpha_y > f_{cp}$. Однак область позитивних значень сили Q_x більша, тому $K_{cm} > 0$, і процес прокатки протікає в сталому режимі, що відповідає умовам експерименту.

В роботі [6] при проведені досліджень впливу змащення на контактні напруження також були отримані епюри в умовах однозонного ковзання металу в осередку деформації (досліди 6 та 7). П.Л.Клименко відмічає: „ ... Процес прокатки при наявності лише зони відставання йде з періодичним буксуванням валків по металу”, тобто деформація не є сталою. У зв’язку з цим, як буде видно з епюр розподілу нормального напруження, на них спостерігаються періодичні коливання та провали.

Проаналізуємо характер зміни напружень q_x, сили Q_x в цих випадках деформації. Епюри контактних напружень при несталому процесі прокатки, а також результати теоретичних розрахунків напружень q_x та сили Q_x наведено на рис.3, криві 2 та 3. Аналізуючи криві поздовжніх напружень q_x, можна помітити, що їх розподіл протилежний раніше розглянутим випадкам. Значення сили Q_x в обох випадках по всій довжині осередку деформації (крім граничних перетинів) є негативними, тому $K_{cm} < 0$, і, як показують попередні теоретичні дослідження, сталий процес прокатки в цьому випадку є неможливим, що підтверджується умовами експериментів.

Таким чином, як теоретичні дослідження [1-3], так і аналіз дослідних епюр контактних напружень показують, що критерій сталості K_{cm}, розрахований з епюр розподілу поточної результуючої горизонтальних контактних сил Q_x, в залежності від параметрів прокатки може приймати різні значення і характеризувати сталість процесу деформації.

Висновки. Теоретично визначено сталість процесу прокатки на основі дослідних епюр контактних напружень. Проаналізовано дані сталої прокатки сталі, свинцю із застосуванням мастила та без нього, а також процесів з пробуксовками металу в валках. Теоретично підтверджено випадки сталої та несталої дослідної прокатки за допомогою показника поздовжньої сталості процесу деформації K_{cm}.

Таким чином, даний метод є універсальним та може використовуватися як компонент для розрахунків параметрів і оптимізації процесу прокатки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Максименко О.П. Уточнение условий продольной устойчивости процесса прокатки / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №1. – С.41-43.
2. Максименко О.П. Методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // Вестник Национального технического университета „Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ “ХПИ” – 2009. – №33. – С.84-90.

3. 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. – 19с.
4. Чекмарев А.П. Анализ процесса прокатки по данным о распределении контактных напряжений / А.П.Чекмарев, П.Л.Клименко // Теория прокатки: материалы Всесоюз. науч.-техн. конф. „Теоретические проблемы прокатного производства"; [под ред. А. П. Чекмарева]. – М.: Металлургия, 1975. – С.33-37.
5. Чекмарев А.П. Методы исследования процессов прокатки / А.П.Чекмарев, С.А.Ольдзиевский. – М.: Металлургия, 1969. – 294с.
6. 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.
7. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П.Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 288с.
8. Целиков А.И. Теория продольной прокатки / А.И.Целиков, Г.С.Никитин, С.Е.Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320с.

Надійшла до редколегії 04.02.2014.