

Національна металургійна академія України

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ СТРУМЕНЯ МЕТАЛУ ПРИ ПРОДУВЦІ АРГОНОМ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ

**Вступ.** Безперервне розливання сталі є фінішною операцією, у результаті якої отримують товарний продукт – заготовку, розміри та властивості якої відповідають готівій продукції (рейкам, трубам, сортовому профілю, тощо). На подальших етапах виробництва можливе лише деяке підвищення механічних властивостей сталі у результаті термічної обробки, суть якої полягає у ініціації дифузійних та бездифузійних процесів у твердих розчинах заліза з метою досягнення стабільних чи метастабільних структур. Ці процеси, однак, не здатні усунути дефекти, що виникли впродовж тверднення металевого розплаву, і саме тому на сучасному етапі розвитку вітчизняної металургії особливу увагу приділяють методам захисту сталі від вторинного окислення та технологіям обробки сталі у передкристалізаційний період (електромагнітне перемішування, «м'яке» обтиснення, обробка інокуляторами та ін.).

З цього погляду перспективною технологією є вдування аргону через порожнистий стопор у проміжному ковші, що чинить комплексний ефект на технологію розливання, сприяючи захисту струменя від вторинного окислення та видаленню газів і неметалевих включень у шлакову фазу проміжного ковша. Також автори роботи [1] стверджують, що у випадку потрапляння бульбашок аргону у кристалізатор зменшується поглиблення перегрітого струменя металу у рідку фазу заготовки та заростання заглибленого стакану при розливанні нержавіючої сталі. Останнє явище є яскравим свідченням того факту, що продувка аргоном є ефективним заходом, спрямованим на попередження вторинного окислення металу.

**Постановка задачі.** Сучасний процес безперервного розливання сталі є одним з найбільш автоматизованих у всьому сталеплавильному виробництві. Вдування аргону у канал розливного стакану призведе до неконтрольованого змінення витрати сталі, що витікає з проміжного ковша. Якщо не враховувати цей вплив, відбудеться порушення рівня металу у кристалізаторі, що може призвести до утворення поверхневих дефектів і, навіть, проривів металу під кристалізатором. Найбільш зручним інструментом для вивчення гальмування потоку металу газовим струменем є фізичне моделювання на водяних моделях.

**Результати роботи.** *Визначення чисел подоби і масштабів фізичної моделі.* Вітчизняні металурги при моделюванні процесу безперервного розливання сталі зазвичай використовували три числа подоби: 1) число Фруда  $Fr$ , що характеризує відношення інерційної сили потоку та гравітаційної сили; 2) число Рейнольдса  $Re$ , що характеризує відношення інерційної сили потоку та сил молекулярного тертя (в'язкості) в рідині; 3) число Вебера  $We$ , що характеризує відношення інерційної та капілярних сил.

Автори робіт [2, 3] вважали автотомельним число Рейнольдса при моделюванні безперервного розливання, а число Вебера взагалі не використовували через відсутність необхідності в імітуванні капілярних явищ. Ті ж самі автори у своїх дослідженнях

приймали за визначний критерій число Фруда. Визначення решти чисел подоби для описання процесу здійснювали відповідно до  $\pi$ -теорема за методикою, що детально описана у попередній роботі [4]. Залежність витрати рідини, що витікає з промковша, можна описати за допомогою залежності

$$w = f(g, \rho_p, h_p, i_z, h_c), \quad (1)$$

де  $w$  – середньовитратна швидкість витікання рідини, м/с;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_p$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$h_p$  – рівень рідини у напірній ємності, м;

$i_z$  – секундний імпульс газового струменя, Н;

$h_c$  – рівень сопла над гирлом заглибного стакану, м.

З залежності (1) отримуємо безрозмірну залежність трьох чисел подоби

$$Fr = f(I, H), \quad (2)$$

де  $Fr = \frac{w^2}{g \cdot h_p}$  – число Фруда;

$I = \frac{i_z}{\rho_m \cdot g \cdot h_p}$  – безрозмірний імпульс газового струменя, який характеризує відношення імпульсу газового струменя до гравітаційних сил, що діють на рідину;

$H = \frac{h_p}{h_c}$  – лінійний симплекс, що характеризує відношення рівня рідини у напірній ємності до висоти сопла над гирлом заглибного стакану.

Система рівнянь, що включає отримані числа подоби, містить 4 змінні параметри ( $w, \rho_p, i_z$ , та лінійний розмір  $l$ ), а, отже, має 2 ступені свободи. Тоді 2 параметра можна обрати довільно, а решта буде визначена з системи рівнянь

$$\begin{cases} k_w^2 \cdot k_i^{-1} = 1; \\ k_i \cdot k_\rho^{-1} \cdot k_l^{-1} = 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $k_w, k_i, k_\rho, k_l$  – відповідно масштаби швидкості, секундного імпульсу газового струменя, густини рідини та лінійний масштаб.

В умовах фізичного моделювання на водяних моделях зручно задати масштаби густини 1:7,2 та лінійний масштаб 1:2. Тоді масштаби імпульсу та швидкості можна розрахувати за формулами:

$$k_w = \sqrt{k_i} = 0,25, \quad (4)$$

$$k_i = k_\rho \cdot k_l = \frac{1}{7,2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{14,4} \approx 0,07. \quad (5)$$

Математична модель взаємодії газового струменя зі струменем рідини має вигляд багатофакторної ступеневої функції

$$Fr = A \cdot I^n \cdot H^m, \quad (6)$$

де  $A, n, m$  – емпіричні коефіцієнти регресії, що визначаються методом найменших квадратів після приведення шляхом логарифмування рівняння (6) до лінійного вигляду.

*Методика фізичного моделювання та аналіз результатів.* Для імітації взаємодії газового струменя з потоком рідини, що витікає з проміжного ковша, сконструйовано фізичну модель у масштабі 1:2 (рис.1), котра складається з напірної ємності 1 з мірною шкалою, з якої вода через скляну трубку 2 витікає до ємності 3 і потім повторно заливається до напірної ємності для наступного досліду. Стиснене повітря з компресора 4 потужністю 1,5 кВт гнучкими шлангами подається до ресиверу 5 об'ємом 35 л, після чого потрапляє до стопора-інжектора 6 із резиновим наконечником. Висоту стопора регулюють за допомогою шарнірної передачі із точністю 0,5 мм. Витрату повітря з ресиверу регулюють вентилем 7, тиск і витрату повітря перед стопором вимірюють відповідно манометром 8 і ротаметром 9. Режими взаємодії газового струменя з рідиною фіксують камерою 10 із частотою 60 кадрів на секунду. Отримане HD-відео розкадровували у програмі VirtualDub для подальшої візуальної оцінки режимів витікання газового струменя з сопла. Зображення зони взаємодії газового струменя з рідиною були оброблені у програмі Adobe Photoshop CS для кращої візуалізації (рис.2).

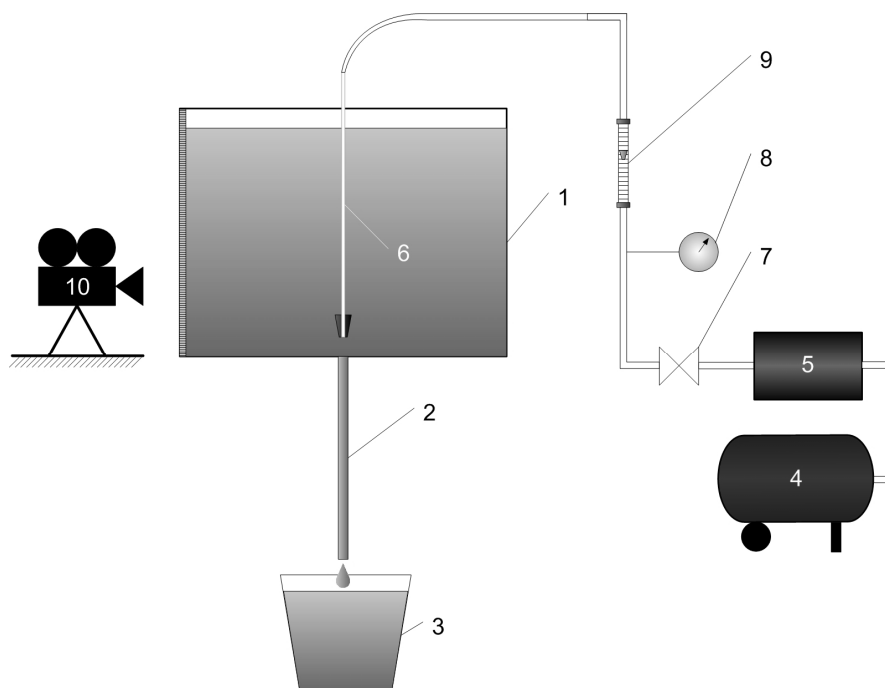
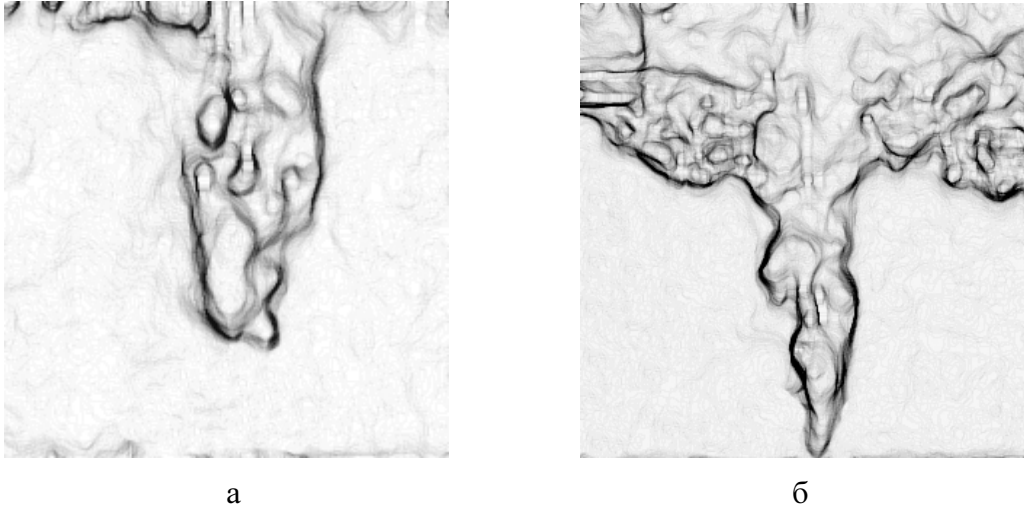


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

При обробці масиву експериментальних даних було відмічено екстремальний характер впливу безрозмірного імпульсу на число Фруда. Точкою екстремуму, у якій число Фруда максимізується, є  $I \approx 10^{-4}$  (рис.3, б). Тому подальшу обробку експериментальних даних у програмі Microsoft Excel здійснювали окремо для двох масивів точок. Статистичні показники отриманих моделей наведено у табл.1.

Аналізуючи статистичні показники моделі (7), наведені у табл.1, а також рис.4, б та рис.5, було виявлено, що безрозмірний імпульс має дві автономні області по відношенню до числа Фруда. Про наявність першої свідчить нерівність  $t_{n,A} < t_{kp}$  при  $I < 10^{-4}$  (табл.1), що говорить про незначний вплив величини безрозмірного імпульсу на число Фруда, яке у цьому діапазоні задовільно описується моделлю (9), зображеною також під рис.3, а.



а) бульбашковий режим:  $H = 1,8$ ,  $I = 1,87 \cdot 10^{-4}$ ,  $Fr = 1,46$  ;  
 б) бульбашково-струминний режим:  $H = 5,6$ ,  $I = 5,63 \cdot 10^{-5}$ ,  $Fr = 0,34$   
 Рисунок 2 – Зображення зони взаємодії газового струменя з рідиною

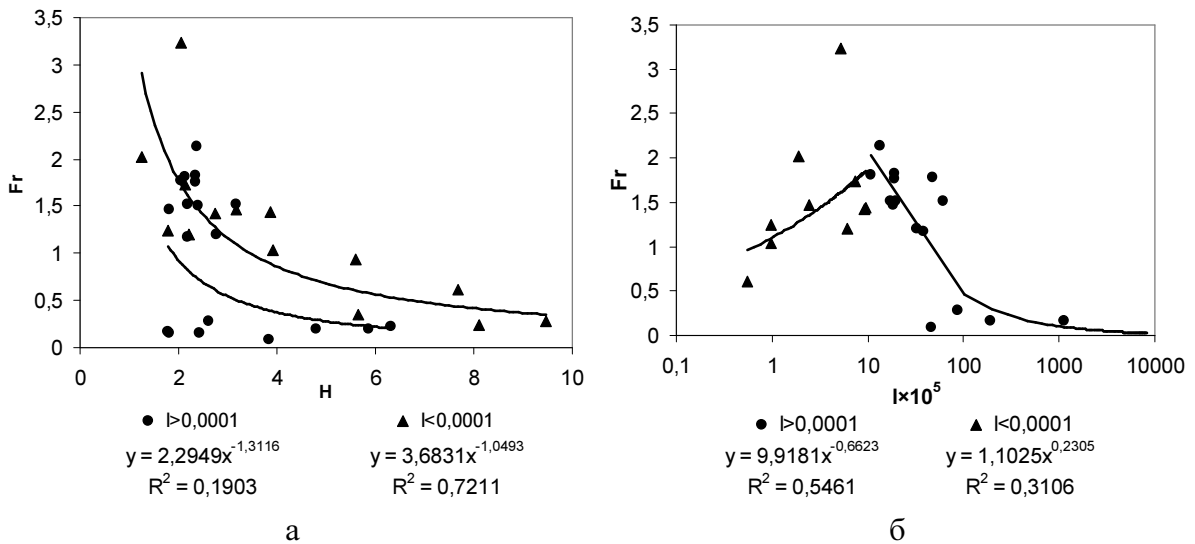


Рисунок 3 – Емпіричні залежності числа Фруда від симплекса висоти стопора (а) та безрозмірного імпульсу газу (б) при вдуванні газу у струмінь рідини

$$Fr = 9,3 \cdot \frac{\sqrt[10]{I}}{H}, \quad (7)$$

$$Fr = \frac{0,01}{I^{0,8} \cdot H^{2,5}}. \quad (8)$$

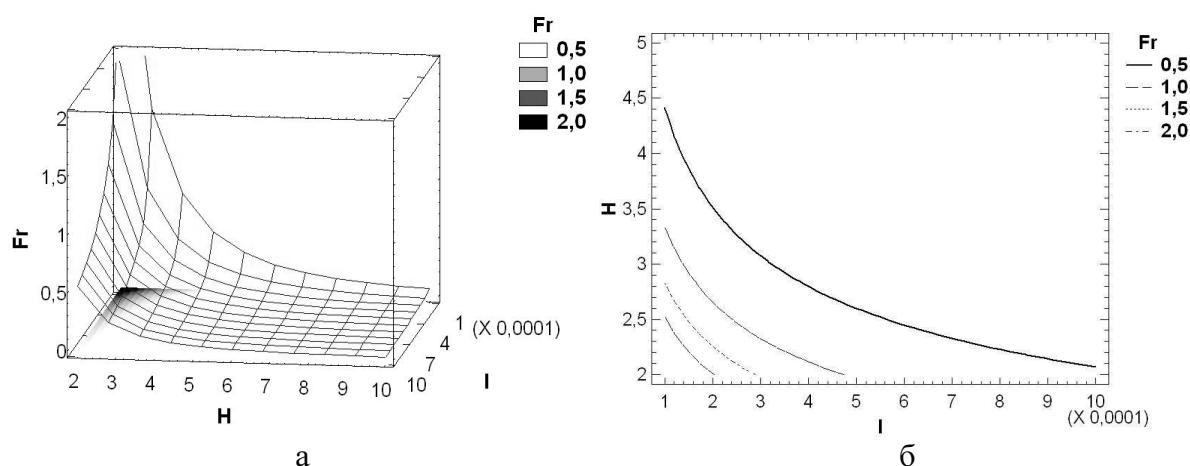
Друга автомодельна область при  $I > 5 \cdot 10^{-2}$  помітна на рис.3, б як майже горизонтальний відрізок кривої, а на рис.4, а – це пласка ділянка поверхні. Таким чином, безрозмірний імпульс має вплив на число Фруда лише при значеннях першого менше за  $5 \cdot 10^{-2}$ , причому при зменшенні безрозмірної висоти стопора цей вплив посилюється.

Перша автомодельна область відповідає випадку високого рівня води у напірній ємності за низької інтенсивності продувки. У цьому випадку інерційні сили потоку ріди-

Таблиця 1 – Статистичні показники математичної моделі

Параметр	Модель (7) $I < 10^{-4}$			Модель (8) $I \geq 10^{-4}$		
	$n$	$m$	$A$	$n$	$m$	$A$
Коефіцієнти регресії	0,0954	-0,9890	9,3383	-0,8147	-2,4772	0,0109
Стандартна похибка	0,1240	0,2004	0,5277	0,1518	0,4589	0,4709
Критерій Стьюдента $t$	0,7693	4,9353	1,8386	5,3677	5,3991	4,1677
Критична величина критерію Стьюдента $t_{кр} (\alpha = 0,05)$	2,1788			2,1199		
Множинний R	0,8633			0,8431		
Коефіцієнт апроксимації $R^2$	0,7453			0,7109		
Нормований $R^2$	0,7029			0,6748		
Стандартна похибка для оцінки числа Фруда	0,1806			0,2835		
F-спостережне значення (F-статистика)	17,5605			19,6715		
F-розподіл вірогідності	$2,7277 \cdot 10^{-4}$			$4,8804 \cdot 10^{-5}$		
Ступінь свободи системи	12			16		

Візуалізовану у STATGRAPHIC модель (8) зображено на рис.4.



а) у вигляді поверхні, б) у вигляді ізоліній

Рисунок 4 – Графічне зображення моделі (8)

$$Fr = 3,7/H. \tag{9}$$

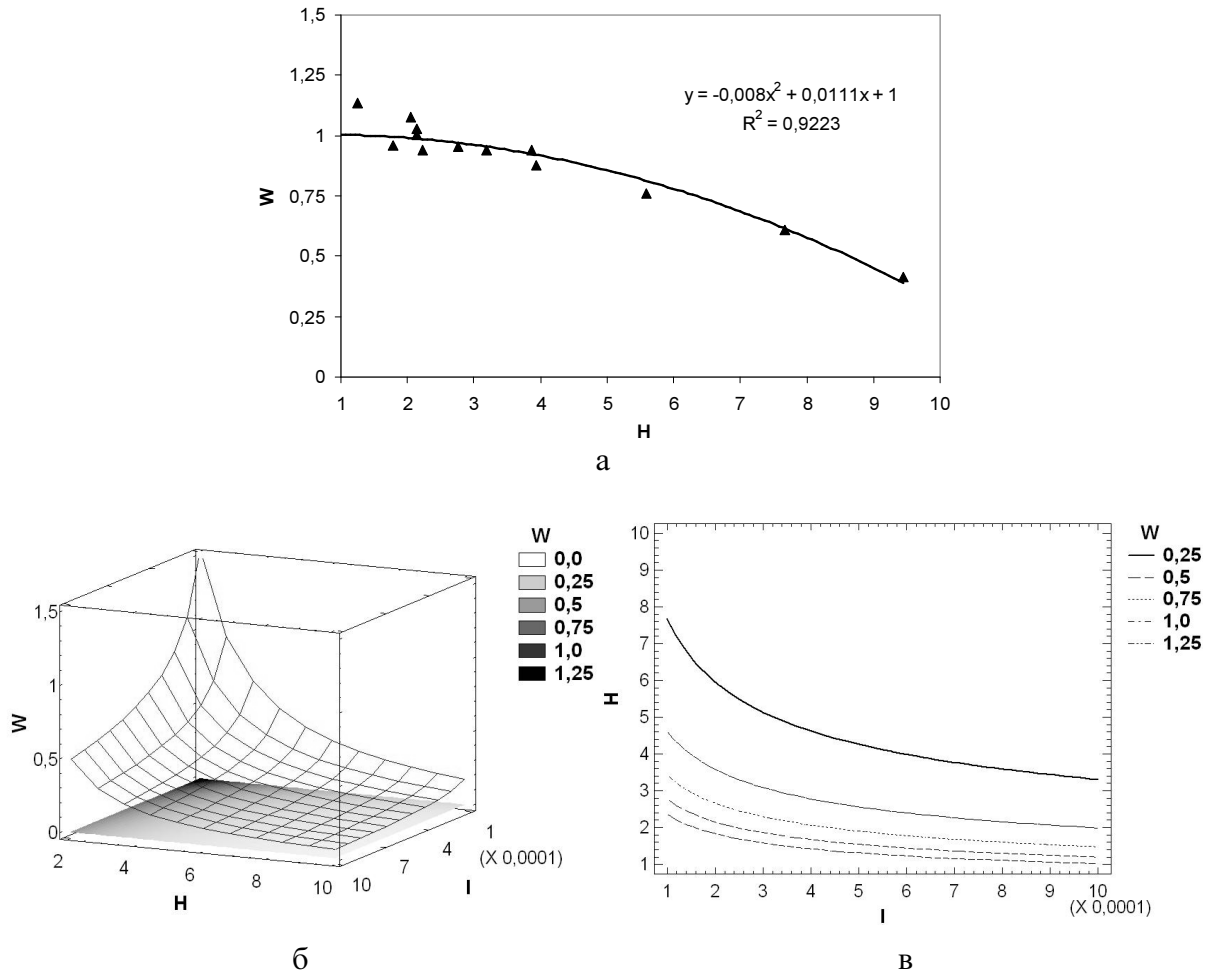
ни, що витікає з напірної ємності, переважають над імпульсом газового струменя. Число Фруда у цьому випадку залежить лише від висоти стопора  $h_c$ , при збільшенні якої (зменшенні  $H$ ) цей вплив посилюється. Друга автотельна область, навпаки, спостерігається при високій інтенсивності продувки за низького напору рідини, тобто, коли імпульс газового струменя переважає над інерційними силами потоку рідини, що витікає з напірної ємності. У цьому разі положення стопору настільки низьке, що струмінь газу практично повністю блокує витікання рідини.

Враховуючи наявність автотельних областей, провели аналіз ефективності гальмування струменя рідини, що може бути описана симплексом швидкості  $W$ . Розраховані математичні моделі (11) і (12) зображено на рис.5.

$$W = \frac{w_{факт}}{w_{ном}} = 1 - \frac{H^2}{125} + \frac{H}{89,73}, \text{ при } I < 10^{-4}, (R^2 = 0,92); \quad (11)$$

$$W = \frac{w_{факт}}{w_{ном}} = \frac{0,04}{\sqrt{I} \cdot H^{1,36}}, \text{ при } I \geq 10^{-4}, (R^2 = 0,73), \quad (12)$$

де  $w_{факт}$ ,  $w_{ном}$  – фактична середньовитратна швидкість за продувки та номінальна швидкість витікання без продувки відповідно.



а) модель (11); б) тривимірне зображення моделі (12);  
в) зображення моделі (12) у вигляді ізоліній

Рисунок 5 – Графічне зображення моделей

З рис.5 видно, що швидкість витікання рідини при продувці може зменшуватися до часткової зупинки або збільшуватися щонайменше у 1,5 рази за різних режимів продувки. Слід зазначити, що коефіцієнти регресії, представлені у табл.1 та формулах (8), (9), (1), (12), можуть несуттєво змінюватися в залежності від профілю стакана-дозатора та довжини заглибного стакана, що вимагає проведення фізичного моделювання на масштабній моделі прототипу.

У промислових умовах продувка відбувається у режимі  $I \geq 10^{-5}$ ,  $H \geq 8$ , за умов якого симплекс швидкості змінюється в межах  $0,3 \div 0,45$ .

**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 металла 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  $K_{cm}$ :

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

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.